AZ NKFI ALAPBÓL MEGVALÓSULÓ PROJEKT

AZ INNOVÁCIÓ LENDÜLETE

BME, *konzorciumvezető*

SW Umwelttechnik Mo. Kft.,
ÉMI Nonprofit Kft. MC Bauchemie,
CRH Mo. Kft.

MŰEGYETEM 1782

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program, B alprogram: Anyagtudományi, technológiai nemzeti program

NVKP_16-1-2016-0019

„Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése”

című pályázat keretében megvalósult laboratóriumi eszköz beszerzés

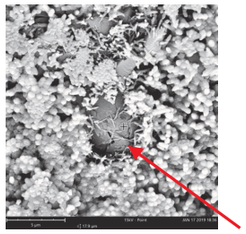
Projektvezető: Prof. Balázs L. György

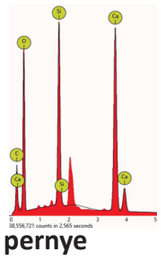
Projekt altéma felelősök: Dr. Lublóy Éva, Dr. Salem G. Nehme, Dr. Kopecskó Katalin

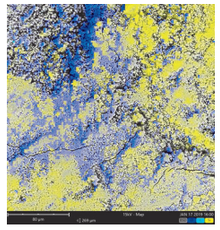
ANYAGTUDOMÁNYI VIZSGÁLATOK NANOSZINTTŐL-MAKROSZINTIG

1. PHENOM XL asztali pásztázó elektron mikroszkóp (SEM) EDAX (energiadiszperz röntgensugaras) elemanalízissel, kis és nagy (max. 100 mm x 100 mm) mintákra



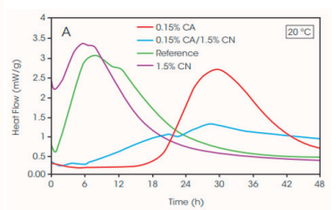


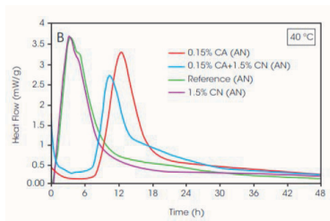




2. TAM Air 3-csatornás kaloriméter, 125 ml-es ampullákkal, alkalmazási tartomány: cementpéptől betonig



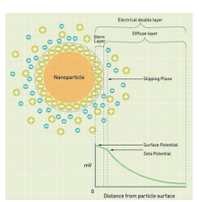


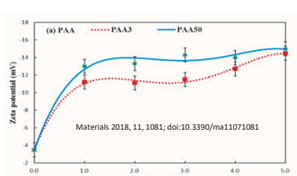




3. Zetasizer Nano ZS – Zéta potenciál mérése titrátorral (változtatható pH tartományban) 3,8 nm – 100 µm, részecske méret mérés 0,3 nm – 10 µm tartományban









NVKP 16-1-2016-0019







TŰZ, FAGY, SAV
PROJEKTBESZÁMOLÓ

Dr. Balázs L. György,
Dr. Salem G. Nehme, Dr. Lublóy Éva,
Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Hlavička Viktor

2021

AZ NKFI ALAPBÓL MEGVALÓSULÓ PROJEKT

AZ INNOVÁCIÓ LENDÜLETE

MŰEGYETEM 1782

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

SW Umwelttechnik MAGYARORSZÁG

ÉMI ÉPÍTÉSÜGYI MINŐSÉGELLENŐRZŐ INNOVÁCIÓS NKFT.

MC BE SURE. BUILD SURE.

CRH

Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program
B alprogram: **Anyagtudományi, technológiai nemzeti program**

NVKP_16-1-2016-0019
Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak fokozottan ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti kifejlesztése

PROJEKTBESZÁMOLÓ





TŰZ



FAGY





SAV

Szerkesztették:

Konzorciumvezető: Prof. Dr. Balázs L. György

Altémafelelősök: Dr. Salem G. Nehme, Dr. Lublóy Éva, Dr. Kopecskó Katalin

Project szakmai titkár: Dr. Hlavička Viktor

Az eredményekből:

Magas követelményeket kielégítő termékek
2 Szabadalmi bejelentés, 4 Know-how regisztráció,
Publikációk: 37, Σ IF: 28,673 (11), SCImago Q1: 7, Q2: 4, Open Access: 17
PhD: 3, Diplomamunkák (23) BSc: 11, MSc: 7, Szakm.: 5, TDK: 3, OTDK: 2

NVKP_16-1-2016-0019

Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése"

2017 márc. 1. – 2020 okt. 30.

BME, 2021

© Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
2021

ISBN 978-963-421-842-5

internetes PDF verzió
ISBN 978-963-421-843-2

Generál kivitelezés: Navigar Kft.

NVKP_16-1-2016-0019
Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózióának ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése

– kutatást záró kiadvány –

TARTALOM

Előszó 7

Lizakovszky Géza: Miért SW? Miért beton? 9

Dr. Balázs L. György: NVKP_16-1-2016-0019 pályázat:
„fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló,
tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" -
projektösszefoglaló 17

*Dr. Lublóy Éva, Dr. Balázs L. György, Dr. Hlavička Viktor,
Biró András, Tóth Péter László:*
Tűzállóság fokozása betontechnológia módszerekkel 59

Dr. Nemes Rita, Szijártó Anna, Dr. Balázs L. György, Dr. Salem G. Nehme:
Előregyártott infrastruktúra elemek fagyállósága légbuborékképző
szerek és kiegészítő anyagok esetén különböző szabványos vizsgálatokkal..... 81

*Dr. Kopecskó Katalin, Horváth Szilvia, Kováts Marcell, Mlinárik Lilla, Must Anita,
Somlai Bálint, Zsovár Zsófia, Dr. Balázs L. György:*
A beton kémiai ellenálló képességének fokozása – áttekintés
az nvkp_16-1-2016-0019 projekt altémájának
feladatairól és eredményeiről 97

Tóth Péter (ÉMI): Az émi nonprofit kft. rövid bemutatkozása 131

Tóth Péter (ÉMI): Az nvkp_16-1-2016-0019 jelű
kutatási projektben készített építésügyi műszaki irányelv
tervezetek rövid bemutatása 141

Dr. Lublóy Éva, Dr. Hlavička Viktor, Dr. Kapitány Kristóf, Dr. Balázs L. György:
Beton vizsgálata ct-vel 151

Földes Tamás:
Röntgen computer tomográf vizsgálati lehetőségek építőanyagokon 171

Schaul Péter, Sólyom Sándor, Dr. Balázs L. György:
Beton fagyállóság ellenőrzése numerikus és kísérleti
eredmények összehasonlításával 197

Molnár Tamás, Lizakovszky Géza: A "fokozott ellenállóképességű
(kémiai korróziónak fokozottan ellenálló, tűzálló és fagyálló)
beton termékek anyagtudományi, kísérleti kifejlesztése" című projekt -
SW Umwelttechnik Kft. összefoglalója 209

Publikációk.....221

Publikációk összefoglalói copy right megjelenés esetén 491

PhD disszertációk.....507

Diplomamunkák, szakdolgozatok.....515

TDK munkák.....555

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS
A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 "Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

ACKNOWLEDGMENT
Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

ELŐSZÓ

Tisztelettel köszöntöm a kutatási projekt eredményei iránt érdeklődők kollégákat!

Jelen kötet célkitűzése az volt, hogy írásos fórumot biztosítson az NKFI Hivatal által támogatott pályázatunk Záróbeszámolójának. A pályázat címe:

„Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése".

A címben lévő **anyagtudományi** szó kihangsúlyozza, hogy ezekben a témakörökben részletekbe menő anyagtudományi vizsgálatok voltak szükségesek.

A **BME Építőmérnöki Karának** hírnevét is öregbíti, hogy ez a pályázat az Építőanyagok és Magasépítés Tanszék tudományos vezetésével került benyújtásra, majd a tervezett szakmai program sikeresen végrehajtva. A konzorcium résztvevői neves cégek az építőipar területéről: ÉMI Nonprofit Kft., SW Umwelttechnik Magyarország Kft., MC-Bauchemie Építőanyagipari és Kereskedelmi Kft. és CRH Magyarország Kft.

A pályázat **három nagyon fontos területen** célzott meg szakmai és tudományos előrehaladást. Mindezen területekhez tartozó betonszerkezetek vonatkozásában igyekeztek a pályázatban együttműködő kollégák sikereket elérni.

A **tűzállóság** alapvető követelmény minden magasépítési szerkezet esetén. Megfelelő tűzállóság biztosítása csak megfelelő anyagválasztással és szerkezeti megoldással lehetséges. Tűzeset után a szerkezet leromlása mértékének és az újjáépítés módjának meghatározása a fontos mérnöki feladat.

A **fagyás-olvadás ciklikusok** kiemelt követelményeket jelentenek kültéri szerkezeteink vonatkozásában. Ha a ciklikusan megfagyó víz bejuthat a szerkezeti anyagba, akkor a belső szerkezet leromlását okozhatja, olyan módon, mintha egy belső fárasztási hatás lenne. A fagyáskori térfogatnövekedés nehezen teljesíthető követelményt jelent betonok esetén. Hídszerkezeti elemek esetén a fagyállóság kiemelt követelményt jelent.

A **kémiai korrózió** veszélyezteti azon műtárgyakat, amelyeknél a környezet agresszivitása jelentős mértékű leromlását okozhatja a beépített anyagoknak. Gondolhatunk itt a szennyvíztisztítókra, csatornákra, silókra, állattartó telepekre, de még a nukleáris létesítményekre is.

A kötet tartalmát bemutattuk egy online szervezésű konferencián – a Nyilvánosság Fórumon, 2020. okt. 29-én, ami lehetőséget biztosított, hogy a bemutatásra kerülő ismeretek sokakhoz eljussanak. Köszönjük a részvételt a konferenciánkon is.

Ezúton is kifejezzük köszönetünket mind az öt konzorciumi tag nevében az NVKP_16-1-2016-0019 "Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Budapest, 2020. okt. 29

Prof. Dr. Balázs L. György
konzorciumvezető

MIÉRT SW? MIÉRT BETON?

NVKP_16-1-2016-0019 Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése

Lizakovszky Géza
SW Umwelttechnik Magyarország Kft.
H 3571 Alsózsolca, Gyár út 5.

Ha egyszerűen szeretnék válaszolni: **Azért SW mert beton és azért beton mert SW**

Ha kicsit bővebben: **Miért beton: Mert már a rómaiak is.**



A rómaiak ún. római cementet (alumínium- és szilíciumtartalmú törmeléket) használtak utak, fürdők, vízvezetékek építésére.

Legismertebb szerkezeti felhasználása a Panteon kupolája.

Miért SW: **Mert már majdnem a rómaiak is…** 😊



Komolyabbra fordítva a szót, az anyavállaltunkat 1910-ben Josef Soiser építőmester és Carl Wolschner építész alapította Klagenfurtban. Így cégünk is cégünk is márt több mint 100 éves múltra tekint vissza betonelemek gyártása terén.

Miért beton: **Mert természetes, tartós és esztétikus**



Túlnyomórész természetes alapanyagokból, jó ellenállóképességű, könnyen alakítható, jól tervezhető közkedvelt anyag. További fejlesztésével mind piaci pozíciónkat erősíthetjük, állami vagy magán megrendelőink elégedettségét fokozhatjuk, a természeti környezet kímélhetjük, ha tartósabb elemeket tudunk előállítani.

Miért SW: **Tartós és esztétikus?**





Az SW Umwelttechnik Magyarország Kft. tulajdonában lévő, többször bővített és átalakított, még 1963-ban épített, fenti képen az építéskori állapotot tükröző BVM Alsózsolcai gyára. Úgy vélem közel 60 év működése után tartósnak nevezhetjük. Az esztétika eléggé szubjektív, de tény, hogy a háttérben látható csarnok a magyar ipari építészet egy említésre méltó műve.

Mai szemmel, legalább is külsőre legújabb gyárunk, mely szintén Alsózsolcán található, esztétikusabbnak mondható.

És még miért SW? **Mert NAGY:**



A projektbe bevont központi gyárunk Pest megyében, Majosházán üzemel. A 16 hektáron elterülő korszerű üzem, Közép-európa legnagyobb előregyártó üzeme.

Cégünk országosan 3 telephelyen, 2019-ben 19 Mrd Ft-ot meghaladó árbevételel mellett kb. 370.000 tonna betont dolgozott be. Különböző mutatószámok alapján folyamatosan versenyben vagyunk a legnagyobb magyarországi betonelem előregyártó címért. 5 üzletágunkban 30 termékcsoportban közel 2000 féle terméket gyártunk.



Az 5 cm-es térkőtől



A 32m-es hídgerendáig

Üzletágaink





KÖRNYEZETVÉDELEM

Aknaelemek (aknagyűrűk, aknaaljak, víznyelő elemek).

Beton- és vasbeton csövek (hengeres, tokos, sajtolható).

Mélyépítési műtárgyak (víztároló elemek, csőmedencék, vasbeton tartályok, víz- és szennyvíztároló tartályok, átemelők).

Környezetvédelmi termékek (olaj- és zsírleválasztó berendezések)

Atereszek, előfejek (rézsűfejes, surrantós).

Kapubejáró támelemek, árokelemek, csatorna elemek.

KÖZLEKEDÉSÉPÍTÉS



útépítési, vasútépítési és hídépítési termékek

támfalak (szögtámfalak, GTT és GTL, máglyatámfal, egyedi támfalak)

Rebloc közúti terelőelemek, útszegélykövek, gömbsüvegek, mederlapok

cölöpök, oszlopgyámok, támlemezek

vasúti távvezeték oszlopok

Ezen két termékkör különösen fontos a pályázat szempontjából, hiszen a kémiai hatásoknak (főként szennyvizek), illetve időjárási hatásoknak (főkánt fagyás-olvadás, utak környezetében sózással súlyosbítva) leginkább kitett elemek.

MAGASÉPÍTÉS







falazó- és zsaluzóelemek

födémszerkezetek (födémbélés elemek, EU feszített födémgerenda, födémpanelek)

áthidalók

kerítéselemek

szőlőoszlopok

állattartó épületek elemei

térkövek

támfalak

Ezen elemcsoportokból a körüreges födémet, mint tűzállóságban érintett elemet, valamint a siló támfalakt emelném ki, mely a mezőgazdaságban sok esetben savas kéimai közegnek van kitéve. A fejlesztések során az életvédelem és a tartósság volt a cél.

HÁLÓZATÉPÍTÉS



távvezeték oszlopok

közvilágítási feszített beton lámpaoszlopok

pörgetett oszlopok (távvezeték és közvilágítási)

SZERKEZETZÉPÍTÉS



Nagy fesztávú, egyedi vasbeton vázszerkezetek egy- és többszintes kivitelben

Egyedi vázszerkezet gyártása, ipari és mezőgazdasági üzemek, raktárak, kereskedelmi központok, áruházak kialakításához.

Stadionok szerkezeti és lelátó elemei



Ezen termékcsoportunkon belül legfőképpen a falelemek fejlesztését tűztük ki célul. Cél volt az élet és vagyonbiztonság növelése.

AMIRE BÜSZKÉK VAGYUNK



Kilen Panorama apartmanház Norvégia, Sandefjord

Az épület szerkezeti elemei cégünknél, Magyarországon készültek.

Sorozattermékek mellett teljesen egyedi igényeket is kielégítünk



A béke jóságos angyala, Siófok.

A szobor kör keresztmetszetű oszlopa szintén az SW Umwelttechnik Magyarország Kft-nél készült.

Az NVKP_16-1-2016-0019 kutatási pályázatban azért vettünk részt – és jelentős részben kezdeményező szerepet is betöltöttünk – mert szeretnénk beton termékeinket még jobb minőségben vásárlóink rendelkezésére bocsátani.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

NVKP_16-1-2016-0019 PÁLYÁZAT: „FOKOZOTT ELLENÁLLÓ KÉPESSÉGŰ (KÉMIAI KORRÓZIÓNAK ELLENÁLLÓ, TŰZÁLLÓ ÉS FAGYÁLLÓ) BETON TERMÉKEK ANYAGTUDOMÁNYI, KÍSÉRLETI FEJLESZTÉSE” - PROJEKTÖSSZEFOGLALÓ

Balázs L. György, konzorciumvezető
BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Kulcsszavak: tűzállóság, fagyállóság, kémiai ellenállóképesség, CT, magas hőmérséklet, ciklikus fagyasztás, agresszív közeg, környezeti hatás, leromlási folyamatok

ÖSSZEFOGLALÓ

Az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” öttagú konzorcium sikeres együttműködésben valósult meg. Konzorciumvezető: BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, tagok: ÉMI Nonprofit Kft., SW Umwelttechnik Magyarország Kft., MC-Bauchemie Építőanyagipari és Kereskedelmi Kft. és CRH Magyarország.

A pályázatunk *három nagyon fontos területen* célzott meg együttműködést, valamint szakmai és tudományos előrehaladást. Mindezen területekhez tartozó betonszerkezetek vonatkozásában igyekeztek a pályázatban együttműködő kollégák sikereket elérni.

A *tűzállóság* alapvető követelmény minden magasépítési szerkezet esetén. Megfelelő tűzállóság biztosítása csak megfelelő anyagválasztással és szerkezeti megoldással lehetséges. Tűzeset után a szerkezet leromlása mértékének és az újjáépítés módjának meghatározása a fontos mérnöki feladat.

A *fagyás-olvadás ciklusok* kiemelt követelményeket jelentenek kültéri szerkezeteink vonatkozásában. Ha a ciklikusan megfagyó víz bejuthat a szerkezeti anyagba, akkor a belső szerkezet leromlását okozhatja, olyan módon, mintha egy belső fárasztási hatás lenne. A víz fagyáskori térfogatnövekedésével szembeni ellenállóképesség nehezen teljesíthető követelményt jelent betonok esetén. Hídszerkezeti elemek esetén a fagyállóság kiemelt követelmény.

A *kémiai korrózió* veszélyezteti azon műtárgyakat, amelyeknél a környezet agresszivitása jelentős mértékű leromlását okozhatja a beépített anyagoknak. Gondolhatunk itt a szennyvíztisztítókra, csatornákra, silókra, állattartó telepekre, de még a nukleáris létesítményekre is.

Jelen kötet célja, hogy áttekintést nyújtson a pályázat indulásáról és az elért eredményekről cikkek formájában (lásd részletesen a Tartalomjegyzékben). Az itt közölt cikkeken kívül további betekintés nyerhető a megjelent magyar és angol nyelvű cikkeinkből, szabadalmi leírásainkból, Know-how-inkból, termékleírásainkból.

A cikkeket követően részletes adatokkal szerepelnek a pályázat során elért publikációk, PhD értekezések, diplomamunkák (BSC, MSc, Szakmérnöki) és TDK munkák.

1 KONZORCIUMVEZETŐ ÉS TAGOK, VALAMINT FELADATAIK

Konzorciumvezető:

BME **Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem** Építőanyagok és Magasépítés Tanszék	

Fő feladatok:

Konzorciumvezetői feladatok és a
három kutatási terület koordinálása:

- tűzállóság,
- fagyállóság,
- kémiai ellenállóképesség.

További részfeladatokban való együttműködés.

Konzorciumi tagok:

SW Umwelttechnik Magyarország Kft. SW Umwelttechnik Magyarország Építőelemgyár Korlátolt Felelőségű Társaság	

Fő feladatok:

- Termék próbagyártás referenciakísérletekhez.
- Kísérleti- és prototípus termékgyártás.
- Az elvégzett referencia-, kísérleti- és prototípus vizsgálatok eredményei alapján kialakított, fokozott ellenállóképességű betonkeverékek és betontermékek, valamint a bevezetésre került új eljárásokkal kapcsolatos iparjogvédelmi eljárások elindítása.

ÉMI Nonprofit Kft. ÉMI Építésügyi és Minőségellenőrző Innovációs Nonprofit Korlátolt Felelősségű Társaság	

Fő feladatok:

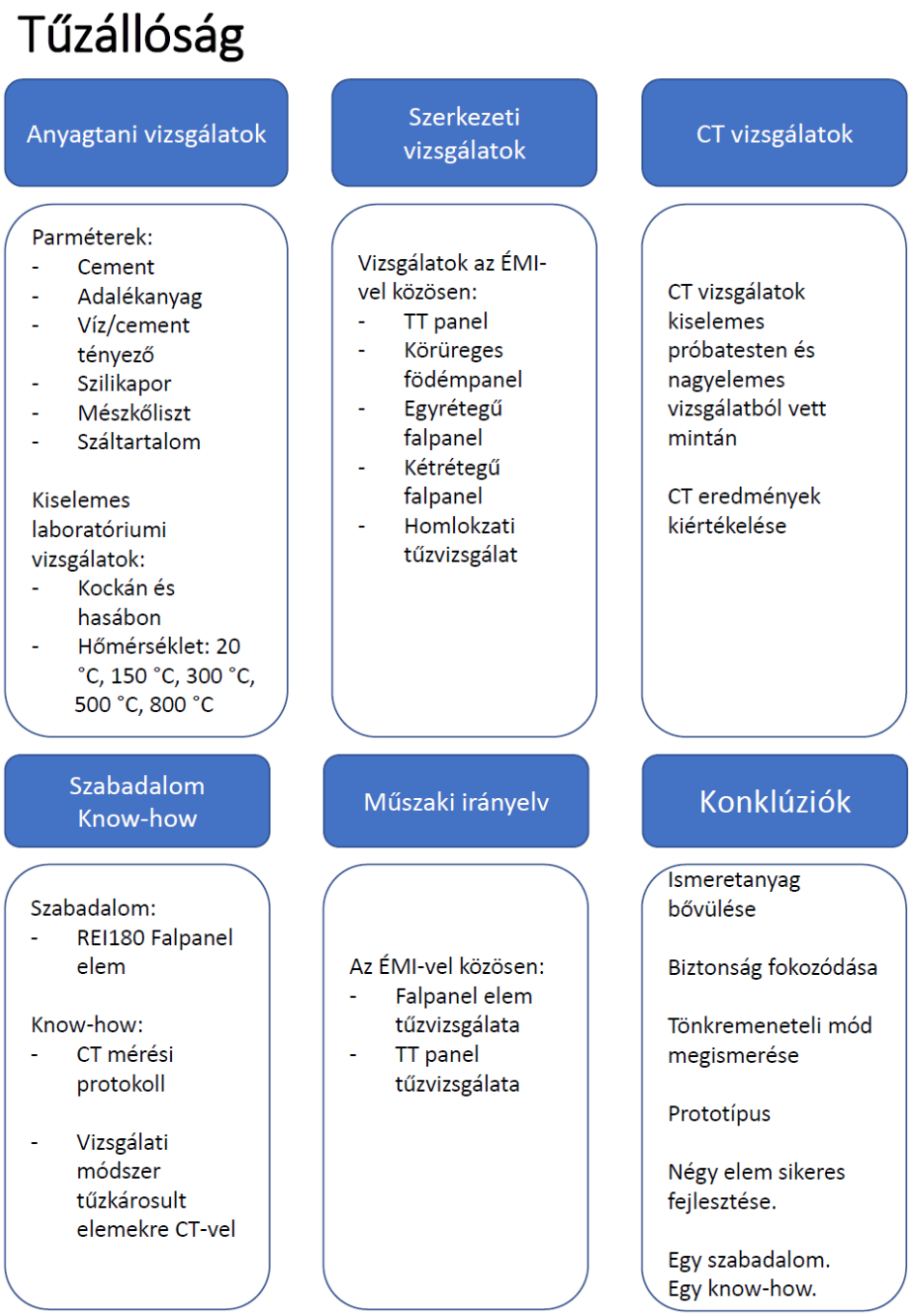
- Prototípus tesztelés, összehasonlító tűzvédelmi vizsgálatok: Egyrétegű falpanel, Kétrétegű falpanel, Körüreges födémpanel, TT panel, Homlokzati tűzterjedés.
- Műszaki Irányelv készítés.

MC-Bauchemie Kft. MC-Bauchemie Építőanyagipari és Kereskedelmi Korlátolt Felelősségű Társaság	
Fő feladatok: - Részvétel a vizsgálatokban, kiemelten az adalékszerek és a kiegészítő anyagok témakörben. Az anyagtani vizsgálatokhoz szükséges adalékszerek és kiegészítő anyagok biztosítása. - Részvétel a prototípus gyártásában helyszíni tanácsadás az adalékszerek és a kiegészítő anyagok témakörében. A prototípus gyártásához szükséges adalékszerek és kiegészítő anyagok biztosítása.	
CRH Magyarország Kft. CRH Magyarország Korlátolt Felelősségű Társaság	
Fő feladatok: - Az előzetes vizsgálatok alapján kiválasztott kötőanyagok alkalmazás szempontjából fontos paramétereinek részletes vizsgálata (anyagtani és betontechnológiai, gyártási homogenitás). - A kiválasztott kiegészítőanyagok, beton adalékszerek és kötőanyagok együttes alkalmazásának részletes vizsgálatai: kombinációk, összeférhetőség, teljesítmények. - Beton gyártási kísérletekhez kötőanyagok biztosítása.	

2 FOKOZOTTAN TŰZÁLLÓ BETON

Altémafelelős: Dr. Lublóy Éva

A következő táblázat hivatott érzékeltetni a kutatás felépítését és a megállapításokat.



A részletes kutatási eredményeink megtalálhatók jelen konferencia kiadványban, a cikkeinkben és a kutatási jelentéseinkben.

A tűzállóság terén, a NVKP_16-1-2016-0019 pályázat során elért legfontosabb eredményeink:

A jelen tudományos összefoglalót *az NVKP- 16 Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése* című projekt keretén belül a tűzállóság fokozásának témakörében a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke készítette, a projekt tudományos beszámolójához.

A pályázat célja volt a tűzhatásra olyan optimális betonösszetétel kifejlesztése, amit az előregyártás során megfelelő technológia mellett alkalmazni tudnak. A pályázat keretén belül a homlokzati falpanelelemek, TT gerendák, illetve a körüreges födémpallók tűzállósági határérték növelését tűztük ki célul.

A kutatás a továbbiakban elemzi azokat a vizsgálati módszereket, amelyek a projekten belül a tűzállóság fokozásával kapcsolatban szükségesek. A módszerektől függően a kísérletek két részre bonthatók: cement és beton vizsgálatokra. A kutatás kitér a vizsgálatok megfelelő előkészítésére és a szabványos elvégzésére is. Továbbá kitér az eddig használt, kiindulási 4 betonreceptúra jellemzésére és azok módosításaira a fokozott tűzállóság figyelembevételével.

Alábbiakban összefoglaljuk a vizsgált 8 eltérő összetételű cement vizsgálati eredményeit és azok értékelését. A cementpép próbatestek maradó nyomószilárdságát 30 mm élhosszúságú kockákon határoztuk meg A nyomószilárdság vizsgálatot a hőterhelést követően, szobahőmérsékletre lehűlt állapotban végeztük el. A nyomószilárdság vizsgálat eredményeit 5 mérés átlagából számolva, 20 °C-os értékre vonatkoztatva adtuk meg. A következő megállapításokat tettük:

(1) a portlandcementből (CEM I 52 N, CEM I 42,5 R) készült próbatestek maradó relatív nyomószilárdsága az 500 °C-os hőterhelést követően 28% - a 20 °C-on mért értékhez képest -, a 800 °C-os hőterhelés után a próbatestek szétestek, nyomószilárdság vizsgálatot nem tudtunk végezni;
(2) a szulfátálló-portlandcementből (CEM I 42,5 N-S) készült próbatestek maradó relatív nyomószilárdsága 500 °C-os hőterhelés után 45%-a; a 800 °C-os hőterhelés után már csak 28 %-a volt a 20 °C-on mért értéknek;
(3) a kétfajta kohósalak-portlandcementből (CEM II/A-S 42,5 R, CEM II/B-S 32,5 R) készült próbatestek maradó relatív nyomószilárdsága 500 °C-os hőterhelés után 46%, illetve 47%; a 800 °C-os hőterhelés után már csak 13%, illetve 20% volt;
(4) a kétfajta pernye-portlandcementből (CEM II/A-V 42,5 R, CEM II/B-V 32,5 R) készült próbatestek maradó relatív nyomószilárdsága 500 °C-os hőterhelés után 19 %, illetve 46%; a 800 °C-os hőterhelés után már csak 16%, illetve 21% volt;
(5) a trasz-portlandcementből (CEM II/A-P 42,5 N) készült próbatestek maradó relatív nyomószilárdsága 500 °C-os hőterhelés után 26%, a 800 °C-os hőterhelés után már csak 24 % volt;
(6) jelentősebb különbség figyelhető meg a portlandcementből (CEM I 42,5 R), illetve szulfátálló-portlandcementből (CEM I 42,5 N-S) készült próbatestek maradó relatív nyomószilárdság értékeiben mind az 500 °C-os, mind a 800 °C-os hőterhelés után;
(7) a nyomószilárdság vizsgálat eredményei és a repedésképek alakulása összhangban vannak egymással. A legtöbb és legerőteljesebb repedést a vizsgált cementek közül a portlandcementből készült próbatestek esetén (CEM I 42,5 R) észleltünk és a szilárdságcsökkenés is itt volt a legjelentősebb mértékű.

TT panel vizsgálat eredményei

Az etalon elem vizsgálata után az elbontás során látható lett, hogy a támaszok között a födém alsó síkjáról a betonréteg lepattogzott (néhol a vasalás alsó síkjáig, 8 cm mélyen) és a vasalás szabaddá vált.

A módosított recepttel készült TT elem vizsgálata után az elbontás során látható lett, hogy a támaszok között a födém alsó síkjáról a betonréteg lepattogzott (néhol a vasalás alsó síkjáig 5 cm mélyen) és a vasalás szabaddá vált.

A födémpanelek tűztéri oldalán a beton lepattogzása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, azonban annak mértéke a 2. vizsgálat során jelentősen kisebb volt, így a 2. vizsgálat után nagyobb vastagságú felső felület maradt meg, amely tény egyúttal magyarázza az előző pontban leírt, kisebb mértékű hőmérséklet-emelkedést és egyben a nagyobb tűzállósági határértéket.

Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 60 volt a módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 90 perecre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a födémekre való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 90, ezért az elem további javítását nem tervezzük.

Az egyrétegű falpanel tűzvizsgálatának

A két egyrétegű falpanel modell tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűztéri oldalán a beton lepattogzása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, a lepattogzás mértéke a 2. vizsgálat során kisebb volt (mind a felületi kiterjedését mintegy 30%, mind a mélységét tekintve a fele, az 1. vizsgálat hasonló adataihoz viszonyítva), így a 2. vizsgálat után nagyobb vastagságú falpanel maradt meg, amely tény egyúttal magyarázza az alsó, a középső és a felső panelek alacsonyabb felületi hőmérséklet-emelkedését, továbbá a legkisebb és a legnagyobb hőmérséklet-emelkedési értékek közötti szűkebb tartományt, a fentiek alapján a 2. vizsgálat során a beton magas hőmérsékleten mutatott viselkedése kedvezőbb volt, amelynek következtében magasabb tűzállósági határértéket lehetett elérni.

Kétrétegű falpanel

A kétrétegű falpanel modell tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűztéri oldalán a beton lepattogzása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, a lepattogzás mértéke a 2. vizsgálat során kisebb volt, így a 2. vizsgálat után nagyobb vastagságú falpanel maradt meg, amely tény egyúttal magyarázza az alsó, a középső és a felső panelek alacsonyabb felületi hőmérséklet-emelkedését, továbbá a legkisebb és a legnagyobb hőmérséklet-emelkedési értékek közötti szűkebb tartományt, a fentiek alapján a 2. vizsgálat során a beton magas hőmérsékleten mutatott viselkedése kedvezőbb volt, amelynek következtében magasabb tűzállósági határértéket lehetett elérni.

A tűzállósági határérték jelentős növekedéséhez az is hozzájárult, hogy a panel illesztéseket a következőképpen alakítottuk ki:

A gyártó szakemberei először a két vasbeton pillért helyezték el a laboratórium által biztosított acél vizsgálókeretbe, majd lapos acélokkal és L alakú acél profilokkal rögzítették azokat a keret alsó részéhez. Ezt követően helyezték el a pillérek közé a szendvics szerkezetű, 350 mm vastag

vasbeton falpaneleket. A pillérek és a panelek közötti illesztéseket Tytan Professional B1 PUR habbal töltötték ki. A panelek vízszintes illesztésénél Hilti CFS-S SIL rugalmas tűzvédő masszát és mögötte Rockwool Steprock ND kőzetgyapot hőszigetelést (ρ = 120 kg/m^3) alkalmaztak.

A panelek körüli illesztéseket MAPEFILL előkevert kiöntőhabarccsal betonjavító habarccsal tömítették.

Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 90 volt, a módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 180 percre módosult. Természtesen az ilyen mértékű határérték növekedéshez a megfelelő illesztések kialakítása is elengedhetetlen. Jelenleg (OTSZ, 2011) a falakra való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 180, ezért az elem további javítását nem szükséges.

A homlokzat vizsgálat során az etalon és a módosított recepttel is a maximális 60 percet értük el.

Körüreges födémpalló

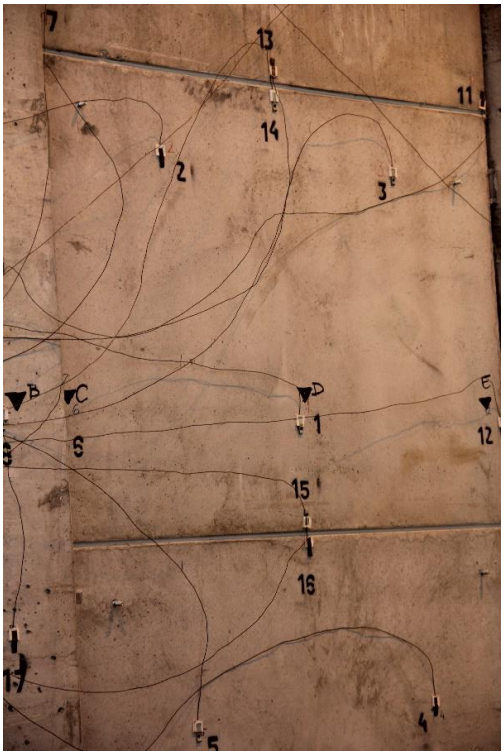
A tűzállóság vizsgálataink során a következő megállapításokat tesszük:

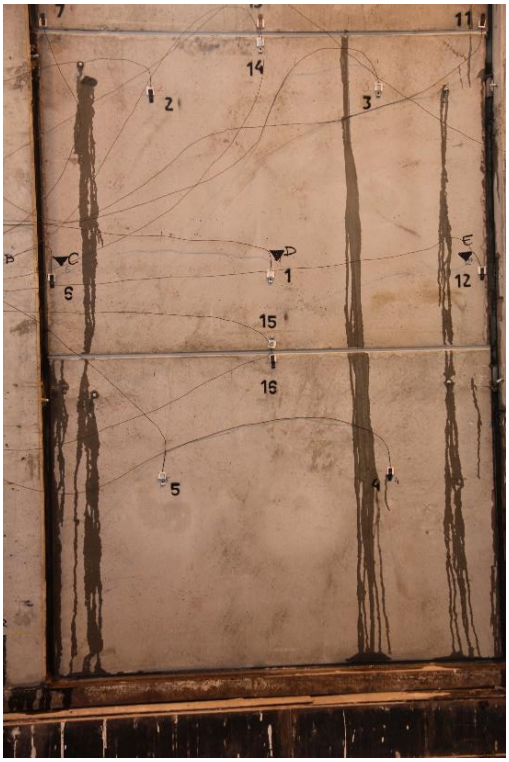
1) A szerkezet érzékeny az adalékanyag választásra, ezért a nagyelemes vizsgálatok előtt célszerű az adalékanyag és az alkalmazott betonösszetétel tűzállóságát megvizsgálni.
2) A kísérletek során a tartó keresztirányú alakváltozását meg kell akadályozni (két elem összeépítése, vagy pántolás).

Véleményünk szerint ezen tartó tűzállósági határértékét kizárólag a betonösszetétel megváltoztatásával nem lehet megoldani, ezért a ***geometria módosítását javasoljuk***, ennek számítására kidolgoztunk egy módszert.









Tűzállósági vizsgálatok az ÉMI Nonprofit Kft. Tűzvédelmi Laboratóriumában

Fölső ábrák: TT gerenda vizsgálat (2018. 10. 19.)

Alsó ábrák: Falpanel vizsgálat (2018. 10. 19.

3 FOKOZOTTAN FAGYÁLLÓ BETON
Altémafelelős: Dr. Salem G. Nehme

A következő táblázat hivatott érzékeltetni a kutatás felépítését és a megállapításokat.



A részletes kutatási eredményeink megtalálhatók jelen konferencia kiadványban, a cikkeinkben és a kutatási jelentéseinkben.

A <u>fagyállóság</u> terén, a NVKP_16-1-2016-0019 pályázat során elért legfontosabb eredményeink:

Az NVKP_16-1-2016-0019. sz. „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak fokozottan ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti kifejlesztése" elnevezésű kutatási projekt fagyállóság témaköréhez tartozó anyagkutatási összefoglaló jelentést tartalmazza a jelen dokumentáció. A kutatási jelentés tartalmaz minden eredményt, melyet a 2020.12.15-ig a megnevezett projekt keretein belül az anyagkutatási labormunkák eredményeztek.

Három infrastruktúra elem összetételét és azok fejlesztését vizsgáltuk, a fejlesztés célja elsősorban a fagyállóság javítása volt, amit mind a peremes hámlasztásos, mind pedig a bemerítéses vizsgálattal ellenőriztünk. Első lépésében két légbuborékképzővel és mészkőliszt kiegészítőanyaggal gyártott elem fejlesztésére készítettünk különböző módosított összetételeket. A két elem eredeti összetétele hasonló. A közúti terelőelem/reblock elem betonjele C40/50-XC4-XF2-16-F5, a vízelvezető elem/előfej C35/45-XC4-XF2-16-F5 (***1. ábra***). A fő különbség a két termék összetétele között, hogy az előfej szálerősített (Concrix makroszállal 3 kg/m^3 adagolással), míg a reblock elem szálerősítés nélküli. Mindkét elem esetén a légbuborékképző-szer elhagyása a cél. Ez műszaki és gazdasági okból is indokolt. Az alapfeltevés, hogy részben vagy egészben helyettesíteni kell a finomrészként adagolt mészkőlisztet hidraulikus kiegészítőanyaggal. Készítettünk optimalizálást egy hídgerenda receptúrára is (***1. ábra***). A hídgerenda esetén nem megengedett a légbuborékképző szerek használata, így itt nem ennek az elhagyása, hanem a fagyállóság növelése a cél. Ebben az esetben a szilárdsági követelmény is magasabb, C50/60-XC4-XF2(H)-16-F5. A hídgerenda receptúra optimalizálásánál a kiegészítő anyagok közé választottuk a szilikaport is.



1. ábra: *A kutatás során fejlesztett elemek balról: előfej/vízelevezető elem; hídgerenda; közúti terelőelem/reblock*

A kutatás során összesen 49 módosított receptúrát kevertünk az Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló laboratóriumában, továbbá vizsgáltuk az SW Umwelttechnik Magyarország Kft. előregyártó üzemében kevert etalon receptúrákat, összesen 8 db prototípust keveréket. A laboratóriumban végeztünk nyomószilárdsági vizsgálatokat 1, 7, 28, 90, 180 és 360 napos korban, vízzárósági vizsgálatot 28, 90 és 180 napos korban, fagyhámlási vizsgálatot 28, 90 és 180 napos korban kezdve, valamint bemerítéses fagyállósági vizsgálatot 28, 90, 180 és 360 napos korban kezdve. Az idő szűke, a berendezések és a vizsgáló mérnökök kapacitása miatt nem minden receptúrából történt minden korban vizsgálat. A kiindulási cement (CEM I 52,5 R, CRH) és a kiegészítőanyag együttes mennyisége álladó volt és az adalékanyag-váz is

azonos volt típusonként. Viszont változtattuk a kiegészítőanyag fajtáját, mennyiségét, és elhagytuk a korábbi kísérletekben alkalmazott légpórusképzőt. Kiegészítőanyagként alkalmazott plusz cement esetén a cementre vonatkozó szabályok szerint megtartottuk a tiszta portlandcementet, a minimálisan előírt mennyiségben. Az MSZ 4798-1 nem ír elő 360 kg/m^3-nél nagyobb minimális adagolást egyik környezeti osztály esetén sem, ezért ezt vettük alapul a kísérleti terv összeállítása során.

Az előfej vagy más néven indítóelem esetén az elsődleges cél a légpórusképző adalékszer elhagyása volt. A gyári receptúra szerinti keveréket elkészítettük az Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló laboratóriumában és a fejlesztett összetételekkel azonos módon vizsgáltuk. Az elvárt betonjel: C35/45-XC4-XF2-16-F5. Az eredeti összetételben a finomrésztartalom biztosítása mészkőliszt adagolással lett megoldva. A fejlesztési koncepcióinkban ezt a mészkőliszt tartalmat, illetve ennek 50%-át terveztük lecserélni kohósalakra, amitől a fagyállóság javulását is várjuk, de a projekt keretében fejlesztett más anyagjellemzők (mint a tűzállóság és a savállóság) esetében is javulást vártunk, elsősorban a szakirodalomban megtalálható németországi tapasztalatok alapján. Sajnos elég hamar realizálódott, hogy Magyarországon nem szerezhető be kohósalak a szükséges mennyiségben és a beszerezhető salakok ráadásul ipari melléktermékek, azaz a minőségük jelentősen eltér a szakirodalmi kísérletekben alkalmazottakhoz képest, ezért úgy döntöttünk, hogy a hozzáférhetetlen kohósalak helyett CEM III/A jelű, nagy kohósalak tartalmú cementtel helyettesítjük a mészkőlisztet.

A rebloc elem esetén az elvárt betonjel: C35/45-XC4-XF2-16-F5. Az összetétel-tervezés során a cement és a kiegészítőanyag összegét 520 kg/m^3-es álladó értéken tartottuk. Az elsődleges cél az eredeti összetételben lévő (0,59%) légpórusképző adalékszer elhagyása volt. A fő különbség még az összetételben az előfejhez képest az volt, hogy ezen elemek eredetileg (sem pedig a módosított összetételek esetén) nem tartalmaztak szálerősítést.

A hídgerenda elem esetén az elvárt betonjel C50/60-XC4-XF2(H)-16-F5. A fejlesztés során az eddigi elemekhez képesti fő különbség az volt, hogy a hídgerenda esetén a kiindulási gyári összetétel sem tartalmaz légpórusképző adalékszert, mert ennek alkalmazása a hídszerkezetek esetében tilos Magyarországon, enélkül kell a fagyállósági követelményeknek megfelelni, erre utal a beton jelében az XF2 környezeti osztály után a (H) jelölés. Ebben a kísérletsorozatban tehát csak a kiegészítőanyagok hatását vizsgáltuk.

Az Anyagvizsgáló laboratóriumban megkevert módosított receptúrák alapján ajánlást tettünk új prototípus receptúrákra. A fagyállósági vizsgálatokból kiderült, hogy a mészkőlisztet érdemes szilikaporral, metakaolinnal vagy kohósalakkal kiváltani az ellenállóképesség fokozása érdekében. A projekt partnereink hosszútávon csak kohósalakos cementet biztosítanak, ezért metakaolin és szilikapor felhasználását a további vizsgálatokban nem alkalmaztunk. Laboratóriumi körülmények között a legellenállóbb betont az említett kiegészítő anyagok közül a kohósalakos cementtel (CEM III/A 32,5 N) kevert receptúrákból kaptuk (M21, M22, M23). Ezen receptúrákat választottuk ki az E1, E2 és E3 etalon receptúrák módosításához. Ezen módosított receptúrák esetén az Anyagvizsgálóban kapott eredmények alapján kijelentettük, hogy sikerült az elvárásoknak megfelelő új receptúrákat kikísérletezni. Az eredményekről általánosságban levonható következtetések az alábbiak:

- Szilárdságra minden esetben szakirodalmilag elvárhatóan volt hatása a különböző kiegészítő anyagok alkalmazásának.
- Legjobb eredményt a fagyasztási vizsgálatok eredményei alapján metakaolin, vagy CEM III, mint kiegészítő anyag alkalmazása hozta.

- Gazdasági kérdés, hogy a plusz siló felállítása az új kiegészítőanyag alkalmazása miatt megvalósítható-e, valamint, hogy melyik kiegészítőanyag alkalmazása egyszerűbb.
- A vízzáróságot érdemben nem befolyásolta ezeknél a recepteknél se szálak jelenléte, se a légpórusképző adalékszer, se a kiegészítő anyag fajtája, mennyisége.
- A két különböző fagyállóság vizsgálat eredményei között lényeges eltérés figyelhető meg, a peremes lehámlás vizsgálatnál elsődleges a tömörség kérdése, a légpórusképző hatása kis mértékű, megfelelően tömör anyag esetén elhagyható, hidraulikus kiegészítőanyag alkalmazása esetén elért tömörség esetén kellően megközelíthetjük/meghaladhatjuk a légpórusképző hatását, míg bemerítéses fagyasztásnál számít a légpórusképző adalékszer jelenléte.
- Minden fagyasztásnál megfigyelhető, hogy a hidraulikus kötőanyag megfelelő működéséhez idő kell, mivel jobb eredményt kapunk a vizsgálatok 90 napos korban történő kezdésekor. Ez nem probléma az előregyártott szerkezeteknél, hiszen reálisan 90 nap után éri majd őket a fagyhatás.
- A fagyállóság szerepe fontosabb, mint a nyomószilárdságé, ezért elsősorban ezeket az eredménykét kell figyelembe venni.

A prototípusként megállapított változatokat a III. mérföldkő során az SW Umwelttechnik Magyarország Kft. majosházi telephelyén ipari körülmények között megkevertünk (ME1, ME2, ME3). A módosított receptúrákban kiegészítő cementként CEM III/A 32,5 N-MSR cementet írtunk elő, mivel a laboratóriumi próbakeverések esetén ezt alkalmaztuk, ám az SW Umwelttechniknél történő keverések esetén CEM III/B 32,5 N-SR/LH került felhasználásra, így kapott eredmények nem feleltek meg a korábbi laboratóriumi keverések alapján támasztott elvárásoknak.

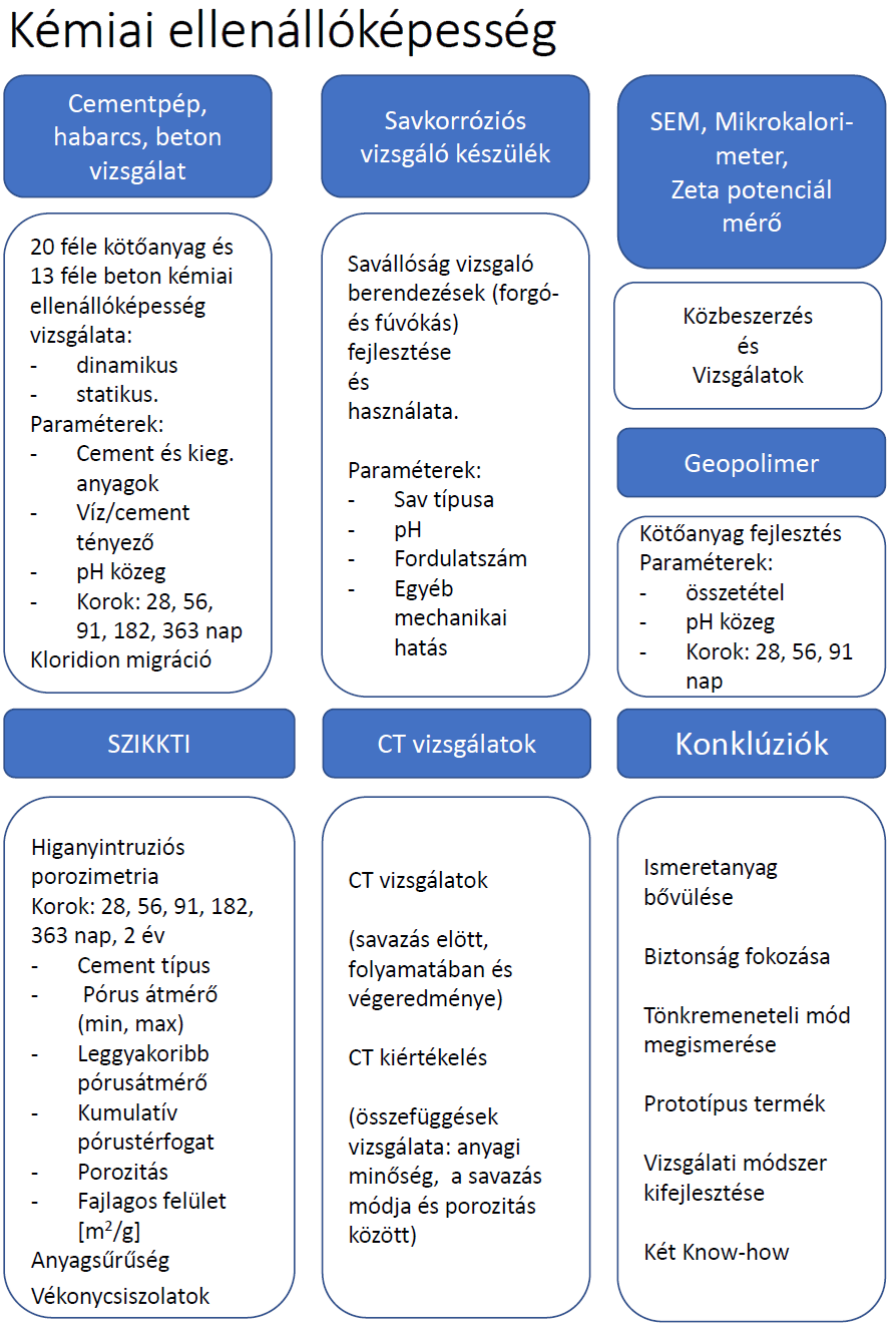
A III. mérföldkő során kapott nem megfelelő eredmények alapján a módosított etalon receptúrák újragondolására volt szükség. A negyedik mérföldkő során, második körként már csak a rebloc és az előfej elem ismétlése történt (M2E1, M2E3), a módosított hídgerenda rendkívül kedvezőtlen eredményei miatt annak továbbfejlesztését nem tartottuk célravezetőnek. Peremes lehámlás vizsgálat során az első módosítás esetén semmilyen környezeti osztályban sem besorolható E1 típus második körben XF2-nek, míg az első módosítás esetén XF2 osztálynak megfelelő E3 típus második körben XF4-nek felel meg. A második körben elvégzett keverések bemerítéses fagyállósági vizsgálata már kedvezőbb eredményeket ad, mint az első körben kapottak, ám 100 és 150 ciklusnál már ezek az értékek sem felelnek meg egyik határértéknek sem, kizárólag 50 ciklus esetén. Így ugyan az eredmények kedvezőbbek és javulás látható, az elvárásokat továbbra sem teljesítik ezek a receptúrák.

A IV. mérföldkő során kapott eredmények már kedvezőbb eredményeket adtak, ám még mindig nem közelítették meg a laboratóriumi körülmények között kapott eredményeket. A végleges receptúrák megfelelősége csak abban az esetben biztosított, ha az összetételük teljes egészében megegyeznek az Anyagvizsgáló Laboratóriumban alkalmazott anyagokéval. A receptúrák a laboratóriumban kapott eredmények alapján megfelelnek a fagyállósági követelményeknek, alkalmazásuk viszont anyaghasználati többlet teherrel jár az SW Umwelttechnik Magyarország Kft. számára, így a receptúrák alkalmazása csak a szervezeti egységük átalakításával lehetséges.

4 FOKOZOTT KÉMIAI ELLENÁLLÓKÉPESSÉGŰ BETON

Altémafelelős: Dr. Kopecskó Katalin

A következő táblázat hivatott érzékeltetni a kutatás felépítését és a megállapításokat.

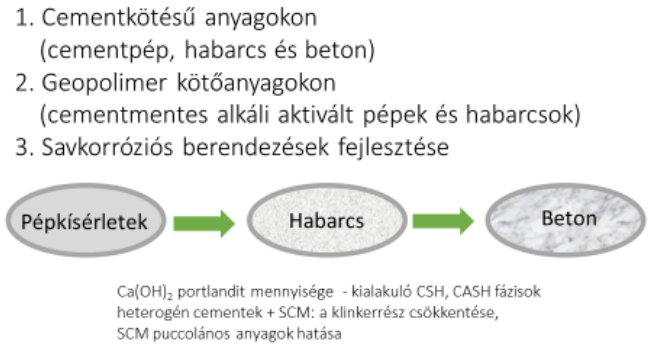


A részletes kutatási eredményeink megtalálhatók jelen konferencia kiadványban, a cikkeinkben és a kutatási jelentéseinkben.

A kémai ellenállóképesség terén, a NVKP_16-1-2016-0019 pályázat során elért legfontosabb eredményeink:

A beton többkomponensű anyagi rendszer, amelynek viselkedését (szilárdságát, tartósságát és egyéb tulajdonságait) jelentős részben összetevőinek tulajdonságai határozzák meg. Kutatásunk ezért kiterjedt különböző, elsősorban előregyártásban használatos portlandcementek és cement kiegészítő anyagok (szilikapor, metakaolin, kohósalak, pernye), a belőlük készített habarcsok, majd egyes előregyártott vasbeton termékek betonjainak széleskörű vizsgálataira.

A három éves kutatás elsődleges célja előregyártott vasbeton elemek tulajdonságainak javítása és ezáltal élettartamának lehetséges növelése volt. A kutatás során az első mérföldkőben cement kiegészítőanyagokkal készített cementpép és habarcs mintákon, a második mérföldkő során kereskedelmi forgalomban kapható, valamint laboratóriumi cementekkel készített cementpép és habarcs mintákon végeztünk kísérleteket, végezetül a harmadik mérföldkőben öt kiválasztott termék és két prototípus termék betonjának kémiai ellenálló képességét vizsgáltuk meg (**2. ábra**).



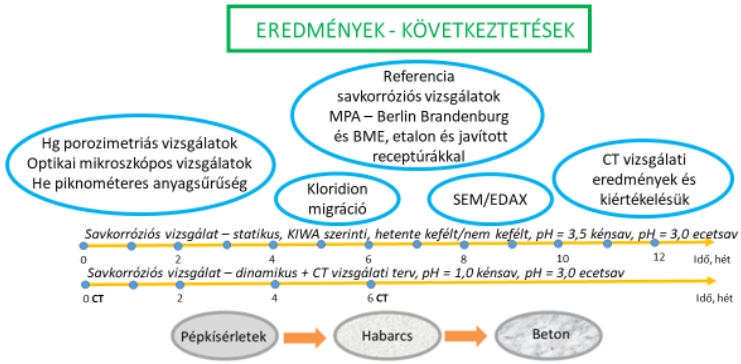
2. ábra: A kutatás fázisai (kémiai ellenálló képesség vizsgálata)

A kémiai ellenállóképességet először cementpép kockákon vizsgáltuk statikus (kézi) módszerrel savas közegekben, abráziós hatással vagy anélkül, majd kifejlesztve a kémiai ellenálló képesség vizsgálatára alkalmas vizsgáló berendezést, dinamikus (gépi) módszerrel habarcs, illetve beton próbatesteken is vizsgáltuk az ellenállóképességet, valamint a tönkremeneteli folyamatokat.

Az ellenálló képességi vizsgálatok eredményeinek alátámasztására, és az ok-okozati összefüggések feltárására a vizsgálati körbe bevont anyagok, valamint vizsgált próbatestek számos tulajdonságát tanulmányoztuk. A kutatásba bevont anyagokat vizsgáltuk a projekt során beszerzett új vizsgáló eszközökkel, nevezetesen vizsgáltuk a porszerű kötőanyagok (cementek és cement kiegészítőanyagok) Zéta-potenciálját, hidratációs hő fejlődését izoterm kalorimetriával, valamint a szemcsék morfológiáját pásztázó elektron mikroszkóppal. Ezekhez a vizsgálatokhoz a projekt támogatásával lehetőségünk nyílt egy Malvern Zetasizer Nano ZS Zéta-potenciál mérő, egy Tam Air háromcsatornás iker-kaloriméter és egy Phenom-World Phenom XL pásztázó elektron mikroszkóp beszerzésére. Ezzel a lehetőséggel Magyarországon elsőként alkalmaztuk a Zéta-potenciál mérésének lehetőségét cementáló kötőanyag szemcséken.

A megszilárdult minták esetében a legfontosabb vizsgálatok között említhetjük meg a kloridionokkal szembeni ellenálló képesség vizsgálatát, valamint a porozitás és változásának vizsgálatát. A kloridionokkal szembeni ellenálló képesség vizsgálatát gyors elektromos

migrációs módszerrel végeztük, a Nordtest NT Build 492 vizsgálati szabvány szerint. A kloridion migrációs vizsgálatokhoz rendelkezésünkre áll két vizsgáló berendezés összesen 6 cellával. A porozitás eloszlás vizsgálatokat a kutatás során a SZIKKTI Kft. (**3 és 4. ábra**) végezte alvállakozóként, higany-intrúziós porozimetriás módszerrel. Ezen kívül a leromlási folyamatok tanulmányozására computer tomograph (CT) vizsgálatokat is végeztettünk (Geosoft Bt. és TOMOGEO Kft., **5. ábra**). A savkorróziós vizsgálatokat követően lehetőségünk nyílt a próbatestek és behatolási frontok tanulmányozására kőzettani vékonycsiszolatokon optikai mikroszkópos módszerrel, valamint pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálattal.



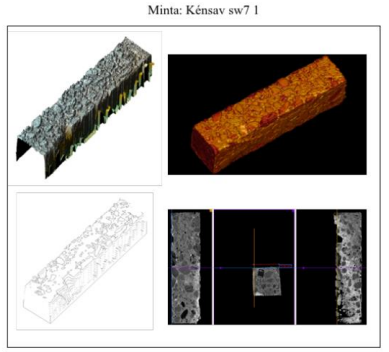
3. ábra: A vizsgálat módszerek egymásra épülése (kémiai ellenálló képesség vizsgálata)



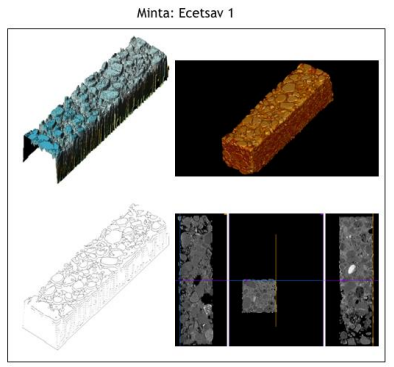
4. ábra: SZIKKTI (kémiai ellenálló képesség vizsgálata - vékonycsiszolatok)

A BME vállalásai közé tartozott, hogy létrehozunk kétfajta savkorróziós prototípus berendezést, amelyek alkalmasak a cementkötésű anyagok (habarcs, beton) kémiai ellenálló képességének, azaz savkorróziójának tanulmányozására. Vállalásunkat teljesítettük azáltal, hogy sikeresen kifejlesztettünk két különböző berendezést: forgórendszerű és savsugaras (fúvókás) rendszerű berendezést. A forgórendszerű berendezésből három került legyártásra, hogy párhuzamosan akár három különböző környezet hatását is tudjuk tanulmányozni. A

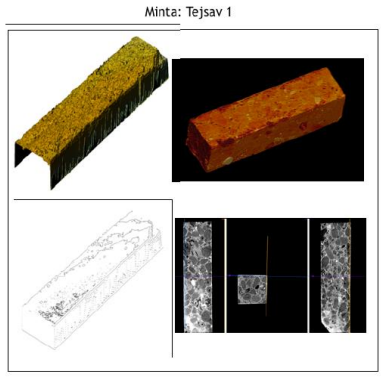
berendezéseket próbaüzem során teszteltük, majd a kutatás célkitűzéseinek megfelelően használtuk habarcs, illetve beton próbatestjeink vizsgálatára (**6. ábra**). Mindkét berendezés használatához kidolgoztunk egy-egy vizsgálati eljárást, amit a BME szellemitulajdon-kezelés szabályzatának előírásait és folyamatát követve és teljesítve a Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala által önkéntes műnyilvántartásba vetettünk (know-how formájában).



7.4. sz. ábra Savazott 3D felszín, izovonalas térkép
és a minta 3D vízualizációja és síkmetszet képei



7.7. sz. ábra Savazott 3D felszín, izovonalas térkép
és a minta 3D vízualizációja és síkmetszet képei



7.10. sz. ábra Savazott 3D felszín, izovonalas térkép
és a minta 3D vízualizációja és síkmetszet képei

5. ábra: Geosoft Bt. és Tomogeo Kft.
CT vizsgálatok, eredmények és értékelésük (az ábrákat készítette Földes Tamás)
Savazott 3D felszín, izovonalas térkép és a minta 3D vizualizációja és síkmetszet képei
(kémiai ellenálló képesség vizsgálata)




6. ábra: A kémiai ellenálló képesség vizsgálatára kifejlesztett laboratóriumi vizsgáló eszközök

A kémiai ellenálló képességet nem csak cementkötésű anyagokon tanulmányoztuk, hanem kitekintve erről a területről, távolabbi célok értelmében és a fenntarthatóság célkitűzéseit is szem előtt tartva, alkáli aktivált anyagokkal, geopolimerekkel is kísérleteztünk. Eredményeink ezen a területen biztatóak, a kötőanyag optimalizálásán keresztül eljutottunk a szálerősítéssel javított tulajdonságú geopolimerekig. A geopolimerek amorf alumino-szilikátok, melyek lúgos közegben (KOH, NaOH) alkáli-szilikátok és alumino-szilikát-oxidok között lejátszódó reakció során állíthatók elő szobahőmérsékleten, vagy ennél magasabb hőmérsékleten (30-100 °C) egyaránt. A reakció egy amorf, félig-kristályos háromdimenziós poli-szialát szerkezetű struktúrát eredményez, mely (Si-Al-Si) kovalens kötésekből áll. A geopolimerek nyomószilárdságban, tűzállóságban, zsugorodás tekintetében túlszárnyalják a betonból kihozható maximumot. Ismert továbbá az agresszív környezettel szembeni kiemelkedő ellenálló képessége is. Kutatásunk során sikeresen kidolgoztunk több geopolimer kötőanyag és habarcs receptúrát, amelyek biztató, a cementkötésű anyagokat túlszárnyaló eredményekkel szolgáltak mind a fenntarthatóság célkitűzéseit figyelembe véve, mind az agresszív környezetnek vagy magas hőmérsékletnek ellenálló anyagok fejlesztésében.

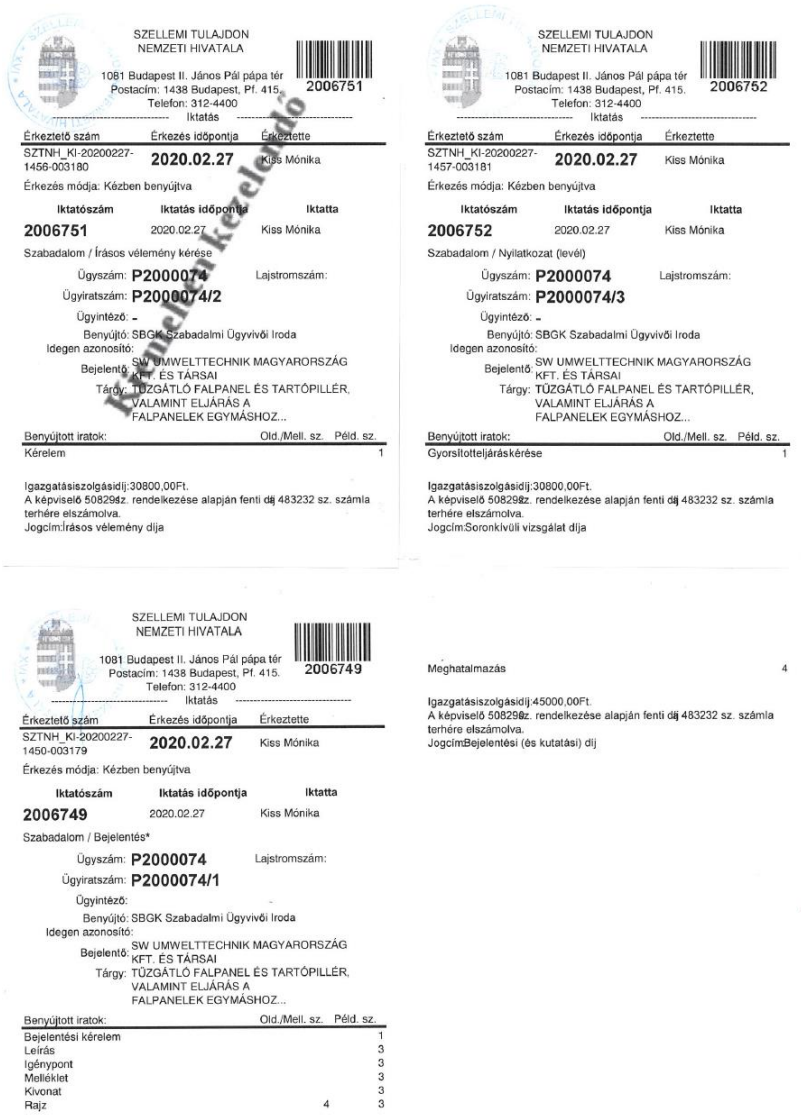
A projektben elért részletes kutatási feladatok eredményeit ezen konferencia kiadvány „Kémiai ellenállóképesség” témakörben elkészített cikkében, valamint a kutatási részjelentésekben mutattuk be, és amely eredményeket a jövőben szakcikkek formájában is publikálunk.

5 BENYÚJTOTT SZABADALMAK

Benyújtott szabadalom 1

- ***Tűzgátló falpanel és tartópillér, valamint eljárás a falpanelek egymáshoz és a tartópillérhez történő csatlakoztatására és a csatlakozás tűzállóvá tételére***

A találmány tárgya tűzgátló falpanel és tartópillér, valamint eljárás a falpanelek egymáshoz és/vagy a tartópillérhez történő csatlakoztatására és a csatlakozás tűzállóvá tételére.
A találmány szerinti tűzgátló falpanel és tartópillér előnyösen előregyártott vasbeton elem, amelyet az jellemez, hogy a betonkeverék megadott térfogat%-ban 100-400 °C olvadáspontú műanyagszálat tartalmaz.



SZELLEMI TULAJDON NEMZETI HIVATALA
1081 Budapest II. János Pál pápa tér
Postacím: 1438 Budapest, Pf. 415.
Telefon: 312-4400
2006751
Iktatás

Érkeztető szám	Érkezés időpontja	Érkeztette
SZTNH_KI-20200227-1456-003180	2020.02.27	Kiss Mónika

Érkezés módja: Kézben benyújtva

Iktatószám	Iktatás időpontja	Iktatta
2006751	2020.02.27	Kiss Mónika

Szabadalom / Írásos vélemény kérése
Ügyszám: P2000074 Lajstromszám:
Ügyiratszám: P2000074/2
Ügyintéző: -
Benyújtó: SBGK Szabadalmi Ügyvivői Iroda
Idegen azonosító:
Bejelentő: SW UMWELTTECHNIK MAGYARORSZÁG KFT. ÉS TÁRSAI
Tárgy: TŰZGÁTLÓ FALPANEL ÉS TARTÓPILLÉR, VALAMINT ELJÁRÁS A FALPANELEK EGYMÁSHOZ...

Benyújtott iratok:	Old./Mell. sz.	Péld. sz.
Kérelem		1

Igazgatásiszolgásidíj:30800,00Ft.
A képviselő 508292sz. rendelkezése alapján fenti díj 483232 sz. számla terhére elszámolva.
Jogcím:Írásos vélemény díja

Kémeleen kezelendő

SZELLEMI TULAJDON NEMZETI HIVATALA
1081 Budapest II. János Pál pápa tér
Postacím: 1438 Budapest, Pf. 415.
Telefon: 312-4400
2006752
Iktatás

Érkeztető szám	Érkezés időpontja	Érkeztette
SZTNH_KI-20200227-1457-003181	2020.02.27	Kiss Mónika

Érkezés módja: Kézben benyújtva

Iktatószám	Iktatás időpontja	Iktatta
2006752	2020.02.27	Kiss Mónika

Szabadalom / Nyilatkozat (levél)
Ügyszám: P2000074 Lajstromszám:
Ügyiratszám: P2000074/3
Ügyintéző: -
Benyújtó: SBGK Szabadalmi Ügyvivői Iroda
Idegen azonosító:
Bejelentő: SW UMWELTTECHNIK MAGYARORSZÁG KFT. ÉS TÁRSAI
Tárgy: TŰZGÁTLÓ FALPANEL ÉS TARTÓPILLÉR, VALAMINT ELJÁRÁS A FALPANELEK EGYMÁSHOZ...

Benyújtott iratok:	Old./Mell. sz.	Péld. sz.
Gyorsítotteljáráskérése		1

Igazgatásiszolgásidíj:30800,00Ft.
A képviselő 508292sz. rendelkezése alapján fenti díj 483232 sz. számla terhére elszámolva.
Jogcím:Soronkívüli vizsgálat díja

SZELLEMI TULAJDON NEMZETI HIVATALA
1081 Budapest II. János Pál pápa tér
Postacím: 1438 Budapest, Pf. 415.
Telefon: 312-4400
2006749
Iktatás

Érkeztető szám	Érkezés időpontja	Érkeztette
SZTNH_KI-20200227-1450-003179	2020.02.27	Kiss Mónika

Érkezés módja: Kézben benyújtva

Iktatószám	Iktatás időpontja	Iktatta
2006749	2020.02.27	Kiss Mónika

Szabadalom / Bejelentés*
Ügyszám: P2000074 Lajstromszám:
Ügyiratszám: P2000074/1
Ügyintéző:
Benyújtó: SBGK Szabadalmi Ügyvivői Iroda
Idegen azonosító:
Bejelentő: SW UMWELTTECHNIK MAGYARORSZÁG KFT. ÉS TÁRSAI
Tárgy: TŰZGÁTLÓ FALPANEL ÉS TARTÓPILLÉR, VALAMINT ELJÁRÁS A FALPANELEK EGYMÁSHOZ...

Benyújtott iratok:	Old./Mell. sz.	Péld. sz.
Bejelentési kérelem		1
Leírás		3
Igénypont		3
Melléklet		3
Kivonat		3
Rajz	4	3

Meghatalmazás 4

Igazgatásiszolgásidíj:45000,00Ft.
A képviselő 508292sz. rendelkezése alapján fenti díj 483232 sz. számla terhére elszámolva.
Jogcím:Bejelentési (és kutatási) díj

Benyújtott szabadalom 2

- ***Eljárás fagyállóság vizsgálatára***

A találmány célkitűzése egy olyan eljárás kidolgozása, amely során a vizsgált beton mintadarabot roncsolás mentesen a beton megszilárdulásának korai szakaszában meg tudjuk vizsgálni, és következtetéseket tudunk levonni a vizsgált beton fagyállóságára.



SZELLEMI TULAJDON
NEMZETI HIVATALA
1081 Budapest II. János Pál pápa tér
Postacím: 1438 Budapest, Pf. 415.
Telefon: 312-4400
2006746
Iktatás

Érkeztető szám	Érkezés időpontja	Érkeztette
SZTNH_KI-20200227-1446-003177	2020.02.27	Kiss Mónika

Érkezés módja: Kézben benyújtva

Iktatószám	Iktatás időpontja	Iktatta
2006746	2020.02.27	Kiss Mónika

Szabadalom / Írásos vélemény kérése

Ügyszám: P2000073 Lajstromszám:
Ügyiratszám: P2000073/2
Ügyintéző: -
Benyújtó: SBGK Szabadalmi Ügyvivői Iroda
Idegen azonosító:
Bejelentő: SW UMWELTTECHNIK MAGYARORSZÁG KFT. ÉS TÁRSAI
Tárgy: ELJÁRÁS FAGYÁLLÓSÁG/IZSGÁLATÁRA

Benyújtott iratok:	Old./Mell. sz.	Péld. sz.
Kérelem		1

Igazgatásiszolgásidíj:30800,00Ft.
A képviselő 50829sz. rendelkezése alapján fenti díj 483232 sz. számla terhére elszámolva.
Jogcím:Írásos vélemény díja

Kémelem kezelendő



SZELLEMI TULAJDON
NEMZETI HIVATALA
1081 Budapest II. János Pál pápa tér
Postacím: 1438 Budapest, Pf. 415.
Telefon: 312-4400
2006747
Iktatás

Érkeztető szám	Érkezés időpontja	Érkeztette
SZTNH_KI-20200227-1448-003178	2020.02.27	Kiss Mónika

Érkezés módja: Kézben benyújtva

Iktatószám	Iktatás időpontja	Iktatta
2006747	2020.02.27	Kiss Mónika

Szabadalom / Nyilatkozat (levél)

Ügyszám: P2000073 Lajstromszám:
Ügyiratszám: P2000073/3
Ügyintéző: -
Benyújtó: SBGK Szabadalmi Ügyvivői Iroda
Idegen azonosító:
Bejelentő: SW UMWELTTECHNIK MAGYARORSZÁG KFT. ÉS TÁRSAI
Tárgy: ELJÁRÁS FAGYÁLLÓSÁG/IZSGÁLATÁRA

Benyújtott iratok:	Old./Mell. sz.	Péld. sz.
Gyorsítotteljáráskérése		1

Igazgatásiszolgásidíj:30800,00Ft.
A képviselő 50829sz. rendelkezése alapján fenti díj 483232 sz. számla terhére elszámolva.
Jogcím:Soronkívüli vizsgálat díja

terhére elszámolva.
Jogcím:Bejelentési (és kutatási) díj



SZELLEMI TULAJDON
NEMZETI HIVATALA
1081 Budapest II. János Pál pápa tér
Postacím: 1438 Budapest, Pf. 415.
Telefon: 312-4400
2006744
Iktatás

Érkeztető szám	Érkezés időpontja	Érkeztette
SZTNH_KI-20200227-1443-003176	2020.02.27	Kiss Mónika

Érkezés módja: Kézben benyújtva

Iktatószám	Iktatás időpontja	Iktatta
2006744	2020.02.27	Kiss Mónika

Szabadalom / Bejelentés*

Ügyszám: P2000073 Lajstromszám:
Ügyiratszám: P2000073/1
Ügyintéző:
Benyújtó: SBGK Szabadalmi Ügyvivői Iroda
Idegen azonosító:
Bejelentő: SW UMWELTTECHNIK MAGYARORSZÁG KFT. ÉS TÁRSAI
Tárgy: ELJÁRÁS FAGYÁLLÓSÁG/IZSGÁLATÁRA

Benyújtott iratok:	Old./Mell. sz.	Péld. sz.
Bejelentési kérelem		1
Leírás		3
Igénypont		3
Kivonat		3
Meghatalmazás		4

Igazgatásiszolgásidíj:37400,00Ft.
A képviselő 50829sz. rendelkezése alapján fenti díj 483232 sz. számla

6 REGISZTRÁLT KNOW-HOW-K

Regisztrációba vett Know-how 1

CT mérési protokoll kidolgozása beton ill. vasbeton elemekre

A know how megoldás kiterjed max 15 x 15 x 100 cm befoglaló térfogatnál kisebb méretű, 500 °C magasabb hőmérsékleti károsodáson átesett és 3 kg/l sűrűségnél nagyobb sűrűségű anyagot 5%-nál nem nagyobb mennyiségben tartalmazó tűzkárosodott beton mintákra.



ÖNKÉNTES MŰNYILVÁNTARTÁS
MŰPÉLDÁNY

NYILVÁNTARTÁSI SZÁM: 008531

A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sem szerzői jogi, sem a szellemi alkotásra vonatkozó más jogi védelmet nem keletkeztet, csupán bizonyítási eszközként szolgál annak igazolására, hogy a szerző által a sajátjaként nyilvántartásba vett alkotás a tanúsítvány kiállításának napján a tanúsítványhoz hozzáfűzött műpéldány szerinti tartalommal létezett.

Figyelmeztetés!
A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sértetlen állapotban bizonyító erejű.

SZTNH - 2012.054

Do not open here Nicht hier öffnen Älä avaa tästä Öppna inte Do not open here Nicht hier öffnen

Regisztrációba vett Know-how 2

Tűzkárosult betonelemek vizsgálatára kifejlesztett CT alapú módszer

A beton károsodása 500 °C feletti hőmérséklet esetén egyértelműen kimutatható a CT mérések segítségével. Az 500 °C alatt a beton nem károsodik jelentősen, ezért nem relevánsak a mérési eredmények. A CT mérések segítségével meghatározható a károsodott betonrész mérete, függetlenül a beton tönkremeneteli módjától, ami lehet kémiai átalakulás, vagy a betonfelületek réteges leválása.



ÖNKÉNTES MŰNYILVÁNTARTÁS
MŰPÉLDÁNY

NYILVÁNTARTÁSI SZÁM: 008532

A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sem szerzői jogi, sem a szellemi alkotásra vonatkozó más jogi védelmet nem keletkeztet, csupán bizonyítási eszközként szolgál annak igazolására, hogy a szerző által a sajátjaként nyilvántartásba vett alkotás a tanúsítvány kiállításának napján a tanúsítványhoz hozzáfűzött műpéldány szerinti tartalommal létezett.

Figyelmeztetés!
A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sértetlen állapotban bizonyító erejű.

SZTNH - 2012.054

Do not open here Nicht hier öffnen Älä avaa tästä Öppna inte här

Regisztrációba vett Know-how 3

Vizsgálati protokoll beton ill. vasbeton elemek kémiai ellenálló képességének vizsgálatára ***forgógépes módszerrel***

Protocol for testing the chemical resistance of concrete or reinforced concrete elements with ***rotating machine method***

FIEK Regisztrációs szám: 2020-010

A "forgógépes" vizsgálati protokoll része egy (vagy több savas közeg/körülmény esetén több) olyan berendezés, amely alkalmas arra, hogy habarcs, vagy beton próbatesteket belehelyezve, meghatározott savas körülmények (sav típusa, pl. kénsav, ecetsav, tejsav, valamint a pH értéke, pl. 3,5) mellett savas oldattérfogatban forgatva a próbatesteket, azok **savkorrózióját abráziós** (az áramló folyadék által okozott koptató, kimosó) **hatással gyorsítsuk**.



ÖNKÉNTES MŰNYILVÁNTARTÁS
MŰPÉLDÁNY

NYILVÁNTARTÁSI SZÁM: 009227

A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sem szerzői jogi, sem a szellemi alkotásra vonatkozó más jogi védelmet nem keletkeztet, csupán bizonyítási eszközként szolgál annak igazolására, hogy a szerző által a sajátjaként nyilvántartásba vett alkotás a tanúsítvány kiállításának napján a tanúsítványhoz hozzáfűzött műpéldány szerinti tartalommal létezett.

Figyelmeztetés!
A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sértetlen állapotban bizonyító erejű.

Do not open here / Nicht hier öffnen / Älä avaa tästä / Öppna inte / Do not open here / Nicht hier öffn

Regisztrációba vett Know-how 4

Vizsgálati protokoll beton, ill. vasbeton elemek kémiai ellenálló képességének vizsgálatára ***fúvókás savkorróziós berendezéssel***

Protocol for testing the chemical resistance of concrete or reinforced concrete elements with noozle acid corrosion equipment

FIEK Regisztrációs szám: 2020-013

A savas kémhatású közegek betonra vonatkozó hatására jelenleg nincs olyan jellegű modell, mint pl. a karbonátosodásra, vagy a kloridionok behatolására. A betont érő kémiai hatás a behatolási frontok felületre merőleges irányú terjedésével, sebességével írható le. Jelen megoldásban egy olyan vizsgálati módszert ismertetünk, amely alkalmas arra, hogy adatokat szolgáltasson tetszőleges hosszúságú kémiai hatás behatolásának sebességéről, a behatolási sebesség változásáról, mindezt azonos és ellenőrzött körülmények között elhelyezett beton mintákon.



ÖNKÉNTES MŰNYILVÁNTARTÁS
MŰPÉLDÁNY

NYILVÁNTARTÁSI SZÁM: 009226

A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sem szerzői jogi, sem a szellemi alkotásra vonatkozó más jogi védelmet nem keletkeztet, csupán bizonyítási eszközként szolgál annak igazolására, hogy a szerző által a sajátjaként nyilvántartásba vett alkotás a tanúsítvány kiállításának napján a tanúsítványhoz hozzáfűzött műpéldány szerinti tartalommal létezett.

Figyelmeztetés!
A tanúsítvány és a hozzáfűzött műpéldány sértetlen állapotban bizonyító erejű.

7 PULIKÁCIÓK, PHD-K, DIPLOMAMUNKÁK, TDK DOLGOZATOK

A Pályázatra való köszönetnyilvánítással megjelent

folyóirat cikkek, PhD értekezések, Szakdolgozatok (BSc és Szakirányú továbbképzés), Diplomamunkák (Msc) és TDK dolgozatok

PUBLIKÁCIÓK	
Impakt Faktor - Web of Science):	**11 cikk**
Impakt Faktor – összesített számérték:	**Σ IF: 28,673**
SCImago:	**Q1 = 7 cikk**
	Q2 = 4 cikk
Open Access	**17 cikk**
Folyóirat cikk:	**21**
Publikációk konferencia kiadványban :	**16**
Angol nyelven:	**22**
Magyar nyelven:	**15**

PhD, Diplomamunkák, TDK-ák

- **PhD értekeés:**	**3**
- **BSc Szakdolgozat**	**11**
- **MSc Diplomamunka:**	**7**
- **Szakirányú továbbképzés Szakdolgozat:**	**5**
- **TDK:**	**3**
- **OTDK:**	**2**

Mindezen folyóirat cikkek, PhD értekezések, Szakdolgozatok (BSc és Szakirányú továbbképzés), Diplomamunkák (Msc) és TDK dolgozatok tartalmazták a Köszönetnyilvánításban a pályázatra való hivatkozást a következő formában.

ACKNOWLEDGMENT

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Publikációs lista

db	Cím	Dokumentum típusa	Impakt faktor
	Cikkek		
1.	Lublóy, É., Kopecskó, K., Balázs, G.L., Restás, Á., Szilágyi, I.M., „Improved fire resistance by using Portland-pozzolana or Portland fly-ash cements", *J. THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY* 1:(1) pp. 1-12. (2017), DOI: 10.1007/s10973-017- 6245-0,	Folyóirat cikk	IF: 1.953, SCImago Q2 Open Access
2.	Lublóy, É., Balázs, G.L., Kapitány, K., Barsi, Á., „CT analysis of core samples from fire-damaged concrete structures", *J. MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH,* http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.16.00490,	Folyóirat cikk	IF 1.156, SCImago Q1
3.	*Kopecskó, K. and Balázs, G.L.,* "Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements", *J. ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, Volume 2017 (2017), Article ID 7940247, 13 pages https://doi.org/10.1155/2017/7940247	Folyóirat cikk	IF 1.299, SCImago Q2, Open Access Journals Integrated Service System Project (GoOA) Open Access
4.	*Balázs L. György, Lublóy Éva, Kopecskó Katalin, Salem G. Nehme, Nemes Rita, Kausay Tibor, Józsa Zsuzsanna, Hlavicka Viktor, Kakasy Gergely, Tóth Péter, Nyíri Szabolcs, Lizakovszky Géza, Molnár Tamás, Czirják János, Földes Tamás, Abdelmelek Nabil, Abed Mohammed, Alimrani Naser,* "Tűz hatásai a beton szerkezetére – Helyzetfelmérő jelentés", *VASBETONÉPÍTÉS* 2017/2, pp. 26-32., http://fib.bme.hu/folyoirat/vb/vb2017_2.pdf	Folyóirat cikk	Open Access
5.	*Dr. Balázs L. György – Dr. Kausay Tibor – Dr. Kopecskó Katalin – Dr. Nemes Rita – Dr. Salem G. Nehme – Dr. Lublóy Éva – Dr. Józsa Zsuzsanna – dr. Arany Piroska* "Betonok oldódásos korrózióállósága, savállósága. Helyzetfelmérő jelentés – 1. Rész: a vizek és folyadékok kémhatása, keménysége, agresszív széndioxid-tartalma", *VASBETONÉPÍTÉS* 2017/3 pp.: 42-46, http://fib.bme.hu/folyoirat/vb/vb2017_3/Vb2017_3_pp46-59.pdf	Folyóirat cikk	Open Access
6.	*Balázs, G.L., Kopecskó, K., Lublóy, É.*, „Imroved fire resistance by using different supplementary materials", *PROCEEDINGS, Int. Fire Safety Symposium IFIRESS2017* Napoli, Italy, 7-9 June 2017, pp. 551-556., ISBN 978-88-89972-67-0	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	

7.	*Balázs, G.L., Lublóy, É."*Fire: Structural and Material consequences", *PROCEEDINGS of 5th Int Conf on Contemporary Achievements in Civil Engineering,* Civil Eng. Faculty in Subotica, University of Novi Sad, Serbia	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
8.	*Balázs G.L., Kopecskó K., Alimrani N., Abdelmelek N., Lublóy É.* (2018) "Fire Resistance of Concretes with Blended Cements", *Proceedings of High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet* (Hordijk D., Luković M. (eds)), Springer, Cham, pp 1420-1427. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_163	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
9.	Naser Alimrani – Abdelmelek Nabil – György L. Balázs – Éva Lublóy „Fire behaviour of concrete – influencing parameters", *J. CONCRETE STRUCTURES*, 2017, Vol 18, pp. 36-44. http://fib.bme.hu/folyoirat/cs/cs2017.pdf	Folyóirat cikk	Open Access
10.	*Abdelmelek Nabil; Éva Lublóy*, „Improved fire resistance by using different dosages of metakaolin", *PROCEEDINGS*, "Innovative materials and technologies for concrete structures" (Eds. Balázs, G.L., Koris, K., Kopecskó, K.), CCC2017 Congress Tokaj, 31 Aug.-1 Sept. 2017, pp. 665-673., http://fib.bme.hu/konyvek/ccc2017.pdf	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	Open Access
11.	*Alimrani, N., Balázs, G.L.,* "Structural consequences of fire on concrete structures – Review article", *PROCEEDINGS*, "Innovative maetials and technologies for concrete structures" (Eds. Balázs, G.L., Koris, K., Kopecskó, K.), CCC2017 Congress Tokaj, 31 Aug.-1 Sept. 2017, pp. 665-673., http://fib.bme.hu/konyvek/ccc2017.pdf	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	Open Access
12.	*György L Balázs, Éva Lublóy, Tamás Földes „Evaluation of Concrete Elements with X-Ray Computed Tomography" J. MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING* 30 : 9 pp. 1-9. , 9 p. (2018)	Folyóirat cikk	IF: 1.953 SCImago Q1
13.	*Lublóy Éva, Hlavička Viktor, Nagy Balázs, Biró András, Burai Balázs, Balázs L. György* „Körüreges födémpalló termikus vizsgálata és modellezése", *VÉDELEM TUDOMÁNY:* katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat III : 4 pp. 52-72. , 21 p. (2018)	Folyóirat cikk	
14.	*Lublóy Éva; Nehme G. Salem; Kopecskó Katalin; Abdelmelek Nabil; Hlavicka Viktor; Balázs, L. György* „A betonfelület leválásának hatása a szerkezet tűzállóságára", *PROCEEDINGS,* Köllő, Gábor (szerk.) XXII.Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2018) pp. 141-146. , 6 p.	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	

15.	*Kopecskó K., „*Self-compacting concrete produced with limestone waste" *IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 442(1):012006,* November 2018, pp. 1-10, DOI: 10.1088/1757-899X/442/1/012006	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
16.	*Kopecskó Katalin, Mlinnárik Lilla, Lublóy Éva, Salem G. Nehme, Balázs L. György,* „A beton kémiai ellenállóképességének fokozása", *PROCEEDIGS,* Köllő, Gábor (szerk.) XXII.Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2018) pp. 106-111. , 6 p.	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
17.	*Nehme G. Salem, Jakab András, Lublóy Éva, Kopecskó Katalin, Sinka Alex, Szijártó Anna, Balázs L. György:* Előregyártott beton elemek betonjának fagyállósága, *PROCEEDINGS*, In: Köllő, Gábor (szerk.) XXII.Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2018) pp. 174-148. , 5 p.	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
18.	*Dr. Majorosné Lublóy Éva Eszter, Dr. Balázs L. György, Földes Tamás, Dr. Kapitány Kristóf, Hlavička Viktor „CT alkalmazási lehetőségei az építőanyagok vizsgálatánál" VASBETONÉPÍTÉS, XX. évf. 4., 2018, pp.89-93*	Folyóirat cikk	Open Access
19.	*Lublóy Éva, Hlavička Viktor, Kapitány Kristóf „Beton tűzterhelés utáni szilárdság- és mikroszerkezeti vizsgálata CT-vel", VÉDELEM TUDOMÁNY, IV. évfolyam, 2. szám, 2019, pp. 1-22*	Folyóirat cikk	
20.	*Dr. Balázs L. György – Dr. Kausay Tibor – Dr. Kopecskó Katalin – Dr. Nemes Rita – Dr. Nehme Salem G. – Dr. Lublóy Éva – Dr. Józsa Zsuzsanna – Dr. Arany Piroska:* Betonok oldódásos korróziója. Szakirodalmi áttekintés. 2. rész: A cement kötőanyagú betonok agresszív szervetlen anyagok okozta oldódásos fizikai, kémiai korróziója. *VASBETONÉPÍTÉS.* XXI. évfolyam. 2019. 3. szám. pp. 40-51.	Folyóirat cikk	Open Access
21.	*Abed, Mohammed ; Nemes, Rita ; Lublóy, Éva: „*The impact of time on the heat resistance of self-compacting high-performance concrete incorporated with recycled materials", J. *THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY* 1 : 1 pp. 1-11, (2019)	Folyóirat cikk	IF: 2,471 SCImago Q2 Open Access
22.	*Lublóy, Éva: „*Hogyan befolyásolja a betonszilárdság a tűzállósági határértéket?", *VÉDELEM TUDOMÁNY* katasztrófavédelmi, online tudományos folyóirat IV : 4 pp. 50-73. , 24 p. (2019)	Folyóirat cikk	
23.	*Lublóy, Éva; Kapitány, Kristóf; Balázs, György L.; Földes, Tamás; Hlavička, Viktor; Hlavicka-Laczák, Lili:* "CT and laboratory test of the wall panels after fire load", *J. CONSTRUCTION*	Folyóirat cikk	IF: 4,046 SCImago Q1 Open Access

	AND BUILDING MATERIALS 211 pp. 1105-1116. , 12 p. (2019)		
24.	*Lublóy, É., Balázs, G.L,*: "Rate of temperature dependence of concrete", *fib* Symposium 2020 Shanghai, *PROCEEDINGS*	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
25.	*Katalin Kopecskó, Mátyás Hajdu and György L. Balázs:* „Fresh and hardened properties for a wide range of geopolymer binders" In: "Concrete Innovations in Materials, Design and Structures", 16th *fib* Symposium *PROCEEDINGS*, 27-29 May 2019, Krakow, Poland	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
26.	*Kopecskó Katalin, Balázs L. György:* „Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) alkalmazása építőmérnöki feladatokban" (Application of scanning electron microscope in Civil Engineering) In: *PROCEEDINGS,* XXIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia – ÉPKO", Csíksomlyó, Románia, június 13–16.	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	:
27.	*Balázs, György L.,* "New Materials for Concrete Bridges", PROCEEDINGS, MAUT25 Int. Scientific Symp., Budapest, 17-18 Sept. 2019. pp. 113-130. http://www.maut.hu/mautdata/mediat%C3%A1r/maut25symp/MAUT25_proceedings_FULL_ISBN.pdf	Proceedings cikk	Open Access
28.	*Kerekes, Zsuzsanna; Kopecskó, Katalin; Lublóy, Éva; Janos, Szep: „*The effect of macrostructure and stability on the flammability of non-woven fabrics", March 2020 *J. INDUSTRIAL TEXTILES* DOI: 10.1177/1528083720908803	Folyóirat cikk	IF:1,884 SCImago Q2 Open Access
29.	*Naser S. Alimrani, Gyorgy L. Balazs*: „Synthetic fibres or fibre cocktail in terms of shear capacity of concrete after elevated temperatures", *J. MECHANICS OF MATERIALS*, Volume 148, 2020	Folyóirat cikk	IF: 2,993 SCImago Q1 Open Access
30.	*Naser S. Alimrani, Gyorgy L. Balazs*: Investigations of direct shear of one-year old SFRC after exposed to elevated temperatures, *J. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, Volume 254, 10, 2020, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119308	Folyóirat cikk	IF: 4,419 SCImago Q1 Open Access
31.	*Alimrani, N., Balázs, G.L.:* Concrete at elevated temperatures in terms of shear failure using push-off tests, Magazine of Concrete research (2020). https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00479	Folyóirat cikk	IF: 2,08 SCImago Q1
32.	*Biró András, Hlavička Viktor, Lublóy Éva:* „Betonadalékanyagok viselkedése magas hőmérsékleten", *PROCEEDINGS*, XXIV.	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	

	Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia, 2020, pp. 20-25		
33.	*A. Biró and É. Lublóy,* Classification of aggregates for fire*, J. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, *https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121024*	Folyóirat cikk	IF: 4,419 SCImago Q1 Open Access
34.	*Biró András, Hlavička Viktor, Lublóy Éva:* „Betonadalékanyag minősítése tűzhatásra", *VÉDELEM TUDOMÁNY*: katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat V:3 pp. 27-48. (2020)	Folyóirat cikk	
35.	*Balázs L. György:* Nagy teljesítőképességű betonok – definíciók, lehetőségek, *PROCEEDINGS,* XXIV. Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia, 2020, pp. 1-6	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
36.	*Kausay Tibor, Nehme Salem G., Balázs L. György:* A betonok fagy- és olvasztósó-állóság-vizsgálati hámlásának lassulási folyamata, *VASBETONÉPÍTÉS*, 2020/2, 34-42	Folyóirat cikk	Open Access
37.	*Alimrani, N., Balázs, G.L*: Investigations of direct shear of one-year old SFRC after exposed to elevated temperatures, *fib* Symposium 2020 Shanghai, *PROCEEDINGS*, 23 Nov. 2020	Nemzetközi konferencia, Proceedings cikk	
		No of Publications: 37 **Σ IF = 28,673** **Impact Factor: 11** **Scimago Q1: 7** **Scimago Q2: 4** **Open Access: 17**	
	Disszertációk		
1.	*Abed, Mohammed A.* Green self-compacting high-performance concrete Témavezető: Dr.N emes Rita	PhD disszertáció 2019	
2.	*Hlavička Viktor:* Szálerősítésű, illetve hőkárosodott betonok tulajdonságainak hatása a húzott rögzítőelemek viselkedésére Témavezető: Dr. Lublóy Éva	PhD disszertáció 2019	
3.	*Naser S. Alimrani:* Shear performance of concrete exposed to elevated temperatures Témavezető: Dr. Balázs L. György	PhD disszertáció 2020	
		Σ PhD Theses = 3	

	BSc Szakdolgozatok MSc Diplomamunkák Szakmérnöki Szakdolgozatok		
1.	Vidács András: „Savállóbb betonok készítése", 2017 Konzulensek: Dr. Salem G. Nehme, Dr. Kovács Tamás	BSc Szakdolgozat	1.
2.	*Orf Tamara*: „Előregyártott elemekhez használt betonok tűzállóságának vizsgálata", 2018. január Konzulens: Dr. Lublóy Éva	BSc Szakdolgozat	
3.	*Sinka Alex*: „Előregyártott elemekhez használt betonok fagyállóságának vizsgálata", 2018. január Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	BSc Szakdolgozat	
4.	*Kertész Alexandra*: „Előregyártott elemekhez használt betonok savállóságának vizsgálata", 2018. január Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	BSc Szakdolgozat	
5.	*Kiss Ferenc*: "A beton teljesítőképességének növelése cementkiegészítő anyagokkal", 2018 Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György	BSc Szakdolgozat	
6.	*Timár Tamás*: „Előregyártott betonok fagyállóságának fokozása kiegészítő anyagokkal", 2018 Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	BSc szakdolgozat	
7.	*Szabó Vendel*: „Előre gyártott betonok fagyállóságának fokozása kohósalakos cementtel, mint kiegészítőanyaggal", 2019 Konzulens: Dr. Salem Georges Nehme	BSc szakdolgozat	
8.	*Nagysolymosi Ádám: „*Szerkezeti műanyagok tűzállósága"; SZIE-YBL Nappali építőmérnök BSc / tűz- és katasztrófavédelmi szakirány Konzulens: Kulcsár Béla – Dr. Kerekes Zsuzsanna	BSc szakdolgozat	
9.	*Must Anita Barbara:"* Kiegészítő anyagok hatása a cementek hidratációjára", BME Építőmérnöki Kar, 2020 Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin és Dr. Balázs L. György	BSc szakdolgozat	
10.	*Huttman Szabina:* „Előre gyártott betonok fagyállóságának fokozása MasterSphere adalékszerrel", 2020 Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	BSc szakdolgozat	
11.	*Simon Petra: „*SIKACONTROL AER-200 P adalékszer hatása a betonok fagyállóságára", 2020 Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	BSc szakdolgozat	
12.	*Vági István: „*Előre gyártott saválló betonok fokozása puccolános kiegészítőanyagokkal" 2018	MSc szakdolgozat	

	Konzulens: Dr. Salem G. Nehme		
13.	*Bácskai Gábor*: „Cementkiegészítő anyagok szerepe a beton teljesítőképességének növelésében”, 2018. június Konzulens: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Bódi István	MSc diplomamunka	
14.	*Vajda Noémi Krisztina:* „The role of SCMs in the assessment of the corrosion risk of steel reinforcement”, 2018. június Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Kóris Kálmán	MSc diplomamunka	
15.	*Fejes András Márk:* „Geopolimer kompozitok kötőanyagának optimalizálása a teljesítőképesség fokozása céljából” 2018. június Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Kovács Tamás	MSc diplomamunka	
16	*Cserki László: „*HDT kiegészítőanyag hatása a betonok savállóságára” 2020 Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	MSc szakdolgozat	19
17.	*Russói András: „*Geopolimer habarcs tulajdonságainak javítása”, 2020-2021. Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin és Dr. Balázs L. György	MSc diplomamunka	
18.	*Horváth Szilvia: „*Kiegészítő anyagok hatása a cementek hidratációjára és a beton tulajdonságaira izoterm kalorimetria és Zeta-potenciál vizsgálattal elemezve”, BME-VBK, 2020 Konzulens: Dr. Kopecskó Katalin	MSc diplomamunka	
19.	*Szijártó Anna*: „Előre gyártott betonok fagyállóságának fokozása kiegészítő anyagokkal”, 2018 Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	Betontechnológusi szakmérnöki diplomamunka	
20.	*Zsovár Zsófia: „*Cementkötésű anyagok és tartósság, az összetétel, a szilárdság és a tömegösszetételi tulajdonságok tükrében”, 2020 Konzulens: Dr. Kopecskó Katalin	Betontechnológusi szakmérnöki diplomamunka	
21.	*Biró András: „*Körüreges födémpalló betonjának fejlesztése a tűzállóság fokozása céljából”, 2020 Konzulensek: Dr. Lublóy Éva és Dr. Balázs L. György	Betontechnológusi szakmérnöki diplomamunka	
22.	*Nagy Andrea: „*Új generációs légbuborékképző adalékszerek elvi alkalmazhatósága hídépítésben”, 2020 Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	Betontechnológusi szakmérnöki diplomamunka	
23.	*Polgár Péter: „*Összehasonlító vizsgálat új típusú légbuborékképző adalékszerrel az előregyártásban”, 2020 Konzulens: Dr. Salem G. Nehme	Betontechnológusi szakmérnöki diplomamunka	

		Σ Diplmamunkák = 23 **BSc = 11** **MSc = 7** **Szakm.= 5**	

	TDK munkák		
1.	*Somlai Bálint, Kováts Marcell*: „Cementkötésű anyagok kémiai korróziójának és ellenállóképességének tanulmányozása”, BME Építőmérnöki Kari TDK2019 II. helyezés, javaslat OTDK-n történő részvételre (OTDK2021, benyújtva) Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin és Dr. Balázs L. György	TDK dolgozat	
2.	*Must Anita Barbara:”* Cement kiegészítő anyagok hatása a cementek hidratációjára, izoterm kalorimetriával és Zéta-potenciál vizsgálattal elemezve”, BME Építőmérnöki Kari TDK2019 dicséret Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin és Dr. Balázs L. György	TDK dolgozat	
3.	*Somlai Bálint: „*Cementkötésű anyagok kémiai ellenállóképességének vizsgálata, a módszerek átfogó összehasonlítása”, BME Építőmérnöki Kari TDK2020 I. helyezés, javaslat OTDK-n történő részvételre (OTDK2021, benyújtva) Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin és Dr. Balázs L. György	TDK dolgozat	
		Σ TDK – OTDK **TDK = 3** **OTDK = 2**	

8 KONFERENCIÁINK - NYILVÁNOSSÁG FÓRUMAINK

2019. febr. 22.
NVKP Tűzállóság ankét



BME
konzorciumvezető
SW Umwelttechnik Kft.
ÉMI Nonprofit Kft.
MC Bauchemie
CRH Mo. Kft.



Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program, B alprogram: Anyagtudományi, technológiai nemzeti program

NVKP_16-1-2016-0019

Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése", 2017 márc. 1. – 2020 febr. 28.

Projektvezető: Prof. Balázs L. György, tiszteletbeli elnök (***fib***)
Projekt altéma felelősök: Dr. Lublóy Éva, Dr. Salem G. Nehme, Dr. Kopecskó Katalin

Tűzállóság altéma felelős: Dr. Lublóy Éva
„BETON TŰZÁLLÓSÁGA" - Projekt beszámoló

2019 febr. 22. (péntek), BME K 1. em. 87.

9:00-9:10 9:10-9:20	Prof. Dunai László (BME) Dr. Stocker György (BME)	Dékáni megnyitó Tanszékvezetői megnyitó
9:20-10:00	Prof. Balázs L. György (BME)	Projekt célkitűzései. A tűzállósági kutatás aktualitása és szükségessége. Tapasztalt viselkedés. Nemzetközi szabályozás helyzete
10:00-10:20	Dr. Bérci László, dandártábornok, (Orsz. Katasztrófavédelmi Főig.)	Az Országos Tűzvédelmi Szabályzat (OTSZ) aktualitásai
10:20-10:40	Érces Gergely (Nemzeti Közszolgalati Egyetem)	Vasbeton építményszerkezetek tervezésének tűzvédelmi szabályozása
10:40-11:10	Tóth Péter (ÉMI)	Előregyártott elemek vizsgálati és minősítési módszerei, lehetőségei és korlátjai
11:10-11:40	Dr. Salem G. Nehme (BME)	Passzív védelem tűzállóságra
11:40-11:55	Hlavička Viktor (BME)	Rögzítőelemek teherbírása tűzterhelt betonban
11:55-12:10	Naser Alimrani (BME)	Study of shear strength subjected to high temperatures
12:10-12:20	*Hozzászólások*	
12:20-13:00	**Gundel palacsinta meggyújtása és tesztelése**	
13:00-13:40	Dr. Lublóy Éva (BME)	CT vizsgálati lehetőségei tűzkárosult beton elemeknél
13:40-13.55	Dr. Kopecskó Katalin (BME)	Tűzállóság fokozása geopolimer kötőanyaggal
13:55-14:10	Lizakovszky Géza (SW)	Építészeti falpanelek az előregyártásban
14:10-14:25	Molnár Tamás (SW)	Födémpanelek gyártástechnológiai specialitási
14:25-14:40	Pujcsev Kristóf (MC Bauchemie)	Az adalékszerek és kiegészítő anyagok szerepe a tűzállóság fokozásában
14:40-14:50	*Hozzászólások*	
14:50-15:00	Prof. Balázs L. György (BME): Összefoglaló, Konklúziók. A konferencia nap zárása.	

*Előadások publikálásra benyújthatók a VASBETONÉPÍTÉS folyóiratho*z: http://fib.bme.hu/kiadvanyok.html

2019. szept. 16.
NVKP Fagyallóság ankét

AZ NKFI ALAPBÓL MEGVALÓSULÓ PROJEKT
AZ INNOVÁCIÓ LENDÜLETE

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program, B alprogram: Anyagtudományi, technológiai nemzeti program
BME *konzorciumvezető*, **SW Umwelttechnik Kft., ÉMI Nonprofit Kft., MC Bauchemie, CRH Mo. Kft.**

NVKP_16-1-2016-0019, *"Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw"* 2017 márc. 1. – 2020 febr. 28.

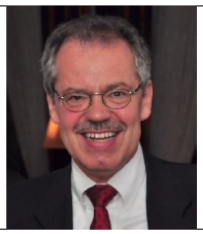
16 Sept. 2019 (Monday), BME Kmf. 85., 14.15 to 17.00

Projektvezető: Prof. Balázs L. György, tiszteletbeli elnök (***fib***)
Projekt altéma felelősök: Dr. Lublóy Éva, Dr. Salem G. Nehme, Dr. Kopecskó Katalin
Fagyállóság altéma felelős: Dr. Salem G. Nehme

Assoc. Prof. György Stocker, Head of Dept. — **Welcome**

Prof. György L. Balázs, Project Coordinator — **Introductory words**

Prof. Harald S. Müller — Freeze-thaw resistance of concrete
– New findings on the mechanisms and prognosis of the degradation –



Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, President of *fib* in 2015 – 2016, e-mail: hsm@mpa.kit.edu
KIT – Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany
Prof. Müller received his academic education in civil engineering at the University of Karlsruhe. After several years of working primarily in consulting business in Berlin, he became a full Professor for Building Materials and Concrete Structures at his alma mater in 1995 (today: Karlsruhe Institute of Technology, KIT). His major research subjects are creep and shrinkage, service life design, durability, sustainability and rehabilitation of concrete structures. By the end of 2017 he became a Prof. Emeritus. Harald Müller is an elected member of the National Science Foundation of Germany. He is Honorary President of the fib, Honorary Member of the ACI and Foreign Member of the Russian Engineering Academy. As a founder and managing partner of the SMP Engineers of Constructions Ltd he is mainly involved in the analysis, rehabilitation and strengthening of concrete structures.

Short summary of presentation: One of the most relevant environmental exposures for concrete structures in moderate climate zones such as Northern and East Europe is the frost attack. Even though the knowledge about the governing mechanisms has tremendously increased, some key aspects related to their time-development are not yet sufficiently understood. Consequently, no generally accepted model allowing to predict the degradation and spalling behaviour is available. Based on an experimental study using Nuclear Magnetic Resonance (NMR) techniques, the water transport behaviour in hardened cement paste and mortars at different water/cement ratios and different temperature exposures during a freeze-thaw attack was investigated. The obtained results constitute the basis for the development of a reliable physically based frost damage model. Even though the model was validated for hardened cement paste and mortar only, it represents a physically sound approach to describe in principle for the first time the development of the frost damage process in structural concrete. Hence, the model allows for a performance based service life prediction for concrete subjected to frost attack.

Péter Schaul, PhD student — **Numerical simulation of freeze-thaw resistance of concrete**

Discussion

Closing

2020. jan. 9 – 10.

Visit of students from the American University of Sharjah, Sharjah, UAE to BME

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS, FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

NVKP_016-0019

PROGRAM

VISIT OF STUDENTS FROM AMERICAN UNIVERSITY OF SHARJAH, UAE TO BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS (BME), DEPARTMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Place: BME, Műegyetem rkp. 3, 1111 Budapest, Building K 1st Floor, Room 87 and 83, MM Building

DAY 1: Thursday, 9 January 2020

8:45-9:00 **Arrival to BME,** Building K room I. 87 and

9:00-9:30 Opening **Prof. László Dunai, Dean and Assoc. Prof. György Stocker, Head of Dept.**

Group 1

9:30-12:00 Visit to the Laboratory (Dr. Balázs Nagy, senior lecturer; Sándor Sólyom, PhD student)

12.00-13:00 Testing structures in fire (Péter Tóth, ÉMI, technical director)

13:00-13:30 Use of industrial and construction wastes in concrete technology (Dr. Olivér Fenyvesi, senior lecturer)

13:30-14:30 Review of ongoing research activities on advanced concrete (Prof. György L. Balázs)

Group 2

9:30 10:30 Review of ongoing research activities on advanced concrete (Prof. György L. Balázs)

10:30-11:00 Use of industrial and construction wastes in concrete technology (Dr. Olivér Fenyvesi, senior lecturer)

11:00-12:00 Testing structures in fire (Péter Tóth, ÉMI, technical director)

12:00-14:30 Visit to the Laboratory

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS, FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

NVKP_016-0019

PROGRAM

VISIT OF STUDENTS FROM AMERICAN UNIVERSITY OF SHARJAH, UAE TO BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS (BME), DEPARTMENT OF CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Place: BME, Műegyetem rkp. 3, 1111 Budapest, Building K 1st Floor, Room 87 and 83, MM Building

DAY 2: Friday, 2020 January 10

Group 1

9:00-9:30 Environmental impact assessment of materials and buildings (Assoc. Prof. Zsuzsa Szalay)

9:30-10:00 Chloride ion binding versus chloride ingress in concrete (Assoc. Prof. Katalin Kopecskó)

10:00-10:30 Anchorage in Concrete Construction (Experimental and Numerical investigations) (Dr. Viktor Hlavicka, lecturer)

10:30-11:00 Fire performance of natural stone facades (András Biró, PhD student)

11:00-12.00 Material testing in fire (Assoc. Prof. Éva Lublóy)

Group 2

9:00-9:30 Chloride ion binding versus chloride ingress in concrete (Assoc. Prof. Katalin Kopecskó)

9:30-10:00 Environmental impact assessment of materials and buildings (Assoc. Prof. Zsuzsa Szalay)

10:00-11:00 Material testing in fire (Assoc. Prof. Éva Lublóy)

11:00-11.30 Anchorage in Concrete Construction (Experimental and Numerical investigations) (Dr. Viktor Hlavicka, lecturer)

11:30-12.00 Fire performance of natural stone facades (András Biró, PhD student)

12:00-14:00 **Visiting construction side (Magyar Zene Háza)**

2020. okt. 29.

Záró konferencia a konzorciumi tagok és a külső nyilvánosság meghívásával

AZ NKFI ALAPBÓL MEGVALÓSULÓ PROJEKT
NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL
AZ INNOVÁCIÓ LENDÜLETE

BME
konzorciumvezető
SW Umwelttechnik Kft.
ÉMI Nonprofit Kft.
MC Bauchemie
CRH Mo. Kft.

MŰEGYETEM 1782
fib Hungary
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program, B alprogram: Anyagtudományi, technológiai nemzeti program

Projekt Záró Ankét - Online

NVKP_16-1-2016-0019
Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése", 2017 márc. 1. – 2020 okt. 31.
2020 okt. 29. (csüt.)

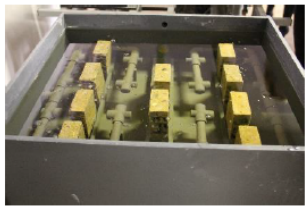
Projektvezető: Prof. Balázs L. György, tiszteletbeli elnök (***fib***)
Projekt altéma felelősök: Dr. Lublóy Éva, Dr. Salem G. Nehme, Dr. Kopecskó Katalin

Prof. Palotás László, szoborállításának 15. évfordulójának szentelve

PROGRAM

8:45-9:00	**Megemlékezés Palotás László** születésnek 115. évfordulója és a szoborállítás 15. évfordulója alkalmából **Prof. Dr.-Ing. Palotas M. Laszlo**	

9:00-9:15	**Prof. Dunai László** (BME)	Dékáni, ill. tanszékvezetői megnyitó
9:15-9:30	**Lizakovszky Géza** (SW)	Miért SW? Miért beton?
9:30-10:10	**Prof. Balázs L. György** (BME)	Projekt célkitűzései. Konzorcium munkamódszere. Három kutatási terület (tűz, fagy, sav). Tervezett vizsgálatok köre. Elért eredmények. Prototípusok. Publikációk. Szabadalmak, Know-how-k. Kitekintés. Köszönetnyilvánítás.
10:10-10:50	**Dr. Lublóy Éva** (BME)	Tűzálló betonok: Tennivalók. Kiindulás. Vizsgálatok. Eredmények. Értelmezés. Interpretáció.
10:50-11:00	Kávészünet	
11:00-11:40	**Dr. Salem G. Nehme** (BME)	Fagyálló betonok: Tennivalók. Kiindulás. Vizsgálatok. Eredmények. Értelmezés. Interpretáció.
11:40-12:20	**Dr. Kopecskó Katalin** (BME)	Kémiai korrózionak ellenálló betonok: Tennivalók. Kiindulás. Vizsgálatok. Eredmények. Értelmezés. Interpretáció

12:20- 12:35	**SEM, Zeta Potenciál mérő, Mikrokaloriméter**	**Labor részleg bemutató és megnyitó**  XL Pásztázó elektron mikroszkóp  Mikro-kaloriméter  Zéta-potencial mérő
12:35- 13:00	**Beton savállóság vizsgáló berendezések**	**Labor részleg bemutató és megnyitó** 
13:00- 14:00	Ebédszünet	
14:00- 14:30	**Dr. Csetényi László** University of Dundee, UK	„Effect of fly ash on chloride diffusion and carbonation resistance of concrete" „Pernyék hatása betonok kloridion diffúziójára és karbonátosodására"
14:30- 15:00 15:00- 15:20 15:20- 15:40	**Tóth Péter** (ÉMI)	Homlokzati tűzterjedés vizsgálatának aktualitásai *Műszaki Irányelv 1: Bemutató és Vita* „Feszített homlokzati elemek tűzvédelmi jellemzői" Hozzászólások *Műszaki Irányelv 1: Bemutató és Vita* „Bordás födém panelok tűzvédelmi jellemzői" Hozzászólások
15:40- 15:50	Kávészünet	
15:50- 16:20	**Földes Tamás** (Tomogeo Kft.)	Röntgen CT vizsgálati lehetőségek
16:20- 16:40	**Pethő Csaba - Pujcsev Kristóf** (MC Bauchemie)	PCE folyósítok: Innovációk és a betongyártás realitása
16:40- 17:00	**Szilágyi Tamás** (CRH)	Különböző cementek és kiegészítő anyagok viselkedésének vizsgálata különböző összetételű cementpépekben és habarcsokban
17:00- 17:20	**Somlai Bálint – Dr. Kopecskó Katalin** (BME)	Új vizsgálati módszerek a beton kémiai ellenállóképességének vizsgálatára
17:20- 17:35	**Schaul Péter – Sólyom Sándor – Prof. Balázs L. György**	Beton fagyállóság ellenőrzése numerikus és kísérleti eredmények összehasonlításával
17:35- 17:50	**Molnár Tamás** (SW)	A beton ellenállóbb, mint valaha

Hozzászólások
17.50 – 18.00 **Prof. Balázs L. György** (BME): Összefoglaló, Konklúziók. A konferencia nap zárása.

Előadások publikálásra benyújthatók a VASBETONÉPÍTÉS folyóirathoz: http://fib.bme.hu/kiadvanyok.html

9 MEGÁLLAPÍTÁSOK - NYILVÁNOS PROJEKTÖSSZEFOGLALÓ

Az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése"

A feladatok végrehajtása az 5 konzorciumi tag kiváló együttműködésén alapult: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) – konzorciumvezető, SW Umwelttechnik Magyarország Kft., ÉMI Nonprofit Kft., MC-Bauchemie Kft. és CRH Magyarország Kft.

Eredményeink hasznossága Magyarország számára:
A választott kutatási témáink a **biztonság** (tűzbiztonság), **tartósság** (fagyállóság,) és a **fenntartható fejlődés** (használati élettartam, élettartam növelés) fokozására irányultak. Eredményeink ezekkel kapcsolatos műszaki fejlődést igazoltak: a magasépítés és a mélyépítés területén egyaránt, tehát kiterjedtek közlekedési műtárgyakra, lakóépületekre és ivóvíz, ill. szennyvíz műtárgyakra.

A eredményeink hasznossága az ipari partnereik számára:
Együttműködésünk során kikristályosodott, hogy a tudatos anyagválasztás, és a célszerű gyártástechnológia hogyan szolgálhatják vasbetonszerkezetink jó minőséget, élettartamát és biztonságát.

A Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatalánál 2 új szabadalom (Tűzgátló falpanel és tartópillér, valamint CT eljárás fagyállóság vizsgálatára) és 4 know-how (CT mérési protokoll; Tűzkárosult elemek vizsgálata CT alapú módszerrel; Vasbeton elemek kémiai ellenállóképességének vizsgálata forgógépes módszerrel, ill. fúvókás savkorróziós berendezéssel) került benyújtásra, ill. regisztrálásra. Továbbá 1 új termék és 3 prototípus termék adja meg az előrelépést a konkrét alkalmazás, valamint további fejlesztés irányában vasbetonszerkezetek tűzállósága, fagyállósága és kémiai ellenállóképessége vonatkozásában.

Az ÉMI Nonprofit Kft. Tűzvédelmi Laboratóriumának kapacitásával és tudásával, valamint az SW Umwelttechnik Magyarország Kft., a MC-Bauchemie Kft. és a CRH Magyarország Kft. gyártási kapacitásával és tudásával járultak hozzá a pályázat sikeréhez.
Vizsgálataink kiterjesztését az anyagok mikroszerkezetének megismerésére a SZIKKTI, és a CT vizsgálatok terén a Tomogeo és a Geosoft Kft. segítette.

A eredményeink hasznossága a BME, mint konzorciumvezető számára:
Az Egyetem biztosította a kutatói hátteret a kiválasztott mindhárom kutatási irányhoz (tűz, fagy és kémiai ellenállóképesség). Mindezen témák alapos felkészülést igénylő anyagtani vizsgálatokat és fejlesztéseket igényeltek. A pályázatból beszerzet eszközökkel és a pályázat során kifejlesztett vizsgálati módszerekkel a BME áll továbbra is a konzorciumi tagok és más alkalmazók rendelkezésére.

Két új laborrészlegünk alakult (a) Pásztázó Elektron Mikroszkóp (SEM), Mikrokaloriméter és Zeta potencial mérő laborrészleg valamint (b) a kémia ellenállóképesség vizsgáló laborrészleg. Az első laborrészleggel lehetőségünk nyílik a nano méréstartomány vizsgálatára is. A pályázat keretein belül ezen kívül tűzállóság, ill. fagyállóság vizsgáló eszköz állományunk is bővülhetett. A kutatómunkánk során lehetőségünk volt számos hallgató bevonására: PhD, BSc, MSC és TDK kutatásban. 3 PhD értekezés és 2 OTDK dolgozat is született. Tudományos eredményeinket 37 cikk mutatja be, közülük 11 cikk Impakt Faktoros **28,673** összesített Impakt Faktorral. Ezen folyóiratok jelentős részben Q1 és Q2 folyóiratok, Q1 és Q2 összesen 11.

10 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS AZ NKFI HIVATALNAK

Angolul – az angol nyelvű pubilációinkban:
Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

Magyarul – a magyar nyelvű pubilációinkban:
A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 "Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

11 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS AZ EGYÜTMŐKÖDŐ KOLLÉGÁKNAK

Meg szeretném ragadni az alkalmat, hogy minden együttműködő kolléga nevét megörökítsem köszönetem jeléül.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

egyetemi tanár
Dr. Balázs L. György, egyetemi tanár, konzorciumvezető, BME projektvezető
Dr. Kausay Tibor, c. egyetemi tanár
Dr. Józsa Zsuzsanna, c. egyetemi tanár

egyetemi docens
Dr. Kopecskó Katalin, egyetemi docens, altémavezető: kémiai ellenállóképesség
Dr. Nehme Salem Georges, egyetemi docens, altémavezető: fagyállóság
Dr. Majorosné Dr. Lublóy Éva, egyetemi docens, altémavezető: tűzállóság
Dr. Nemes Rita, egyetemi docens
Dr. Arany Piroska, c. egyetemi docens
Dr. Péczeli Imre, c. egyetemi docens

adjunktus
Dr. Fenyvesi Olivér, adjunktus
Dr. Hlavicka Viktor, Projekt szakmai titkár
Dr. Kapitány Kristóf, adjunktus
Dr. Nagy Balázs, adjunktus

tudományos segédmunkatárs
Sólyom Sándor

doktorandusz
Biró András
Jakab András
Schaul Péter
Szijártó Anna

Abed Mohammed
Abdelmelek Nabil
Alimrani Naser

MSc hallgató
Horváth Szilvia

BSc hallgató
Burai Balázs
Kádár Máté
Kocsis János
Kováts Marcell
Móczár Levente
Must Anita
Romanek Ferenc
Somlai Bálint

technikus
Rónaky Viktória, vegyésztechnikus
Takács Krisztián, technikus

adminisztráció
Sánta Ildikó, gazd. ügyintéző
Tulkánné Kovács Bettina, gazd. ügyintéző
Papp Zita Piroska, gazd. ügyintéző
Labundy Dávid, informatikus

BME összesen 36 fő

SW Umwelttechnik Magyarország Kft.
Galló Ferenc, ügyv. ig.
Lizakovszky Géza, minőségirányítási ig.
Molnár Tamás, fejlesztési- és betontechnológiai vezető
Kovács-Kraft Kata, ügyvezetői asszisztens
Szarka Szabolcs, szerkezetépítési üzletágvezető

ÉMI Nonprofit Kft.
Czinger László - Vizsgálat előkészítő
Göttinger Márk - Vizsgáló mérnök
Hajdu Eszter – Projektvezető
Hajdú Zoltán - Vizsgáló mérnök
Horváth Zsolt Soma – Szakértő mérnök
Juhász Imre - Laboratóriumvezető-helyettes, Tűzvédelmi Vizsgáló Laboratórium
Kakasy Gergely László – Tűzvédelmi Vizsgáló, Laboratórium vezető
Kis Kéri József - Vizsgálat előkészítő
Kiss-Sponga Tamás - Vizsgáló mérnök
Komlai Krisztina - Vizsgáló mérnök
Komlai Krisztina - Vizsgáló mérnök
Koncz Gergely - Vizsgáló mérnök

Lánszki Fülöp – Vizsgáló technikus
Parlagi Gáspárné - Vizsgáló mérnök
Somorjai Antal - Vizsgáló mérnök
Sólyomi Péter - Tűzvédelmi Vizsgáló Laboratórium vezető
Szirmai Attila - Vizsgáló mérnök
Tóth Péter – Tudományos főmunkatárs
Zajáros Anett - Projektvezető

MC-Bauchemie Kft.
Pethő Csaba, szakmai vezető
Pujcsev Kristóf, kutató-fejlesztő munkatárs
Sebestyén Zsolt, szakmai munkatárs
Baksy László Ernő, alkalmazástechnikus
Dombi Lajos, alkalmazástechnikus
Dr. Bery-Horváth Ádám, pénzügyi és kontrolling vezető
Horváth Nóra, pénzügyi és adminisztrációs munkatárs

CRH Magyarország Kft.
Magera Ottó, ügyv. ig.
Soós Sándor, Beton üzletág vezető
Temesi Szilárd, kereskedelmi ig.
Szilágyi Tamás, technical support manager
Czirjak János, Műszaki Szolgáltató Központ vezető
Pluzsik Tamás, alkalmazási tanácsadó

Pályázat (konzorcium) összesen 73 fő

Köszönöm az együttműködést:

Prof. Balázs L. György
konzorciumvezető

TŰZÁLLÓSÁG FOKOZÁSA BETONTECHNOLÓGIA MÓDSZEREKKEL

Dr. Lublóy Éva
Dr. Balázs L. György
Dr. Hlavička Viktor
Biró András
BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék
1111 Műegyetem rakpart 1-3

Tóth Péter László
ÉMI Nonprofit Kft.
2000 Szentendre, Dózsa Gy. út 26.

1. ELŐZMÉNY

A 2017. március 1. és 2020. október 30. között *NVKP- 16 Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése* című projekt keretén belül a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke kiterjedt kutatást végzett a különböző szerkezeti elemek tűzállóságának fokozására.

A pályázat célja:

> *tűzhatásra olyan optimális betonösszetétel kifejlesztése, amit az előregyártás során megfelelő technológia mellett alkalmazni tudnak.*

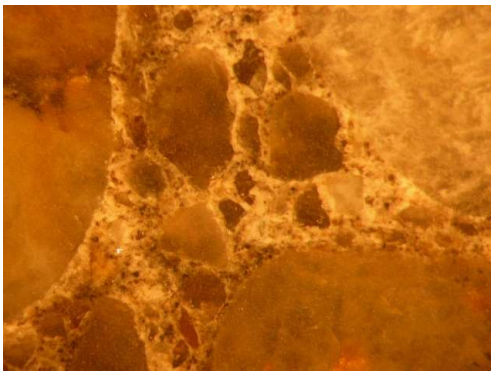
A pályázat keretén belül a homlokzati falpanelelemek (egy és két rétegű), TT gerendák, illetve a körüreges födémpallók tűzállósági határérték növelését tűztük ki célul.

2. SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

Tekintettel arra, hogy a projekt keretén belül vasbeton elemek tűzállósági határérték növelését tűztük ki célul, ezért ebben a fejezetben a beton magas hőmérsékleten való viselkedést ismertetjük. A megszilárdult beton két fő komponensből álló, összetett anyag. A *2.1.* ábra kvarckavics adalékanyagú beton metszetről készített optikai mikroszkópos felvételt mutatunk be. A felvételen jól látható, hogy a megszilárdult beton két fő összetevője az adalékanyag és a cementkő. Hőmérséklet emelkedésének hatására az adalékanyagban és a cementkőben változások következnek be, és ezért romlanak a beton szilárdsági jellemzői. A beton a lehűlés során sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, ill. jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, és végezetül tönkremegy.

A beton tűzterhelés hatására bekövetkező tönkremenetele *Kordina* szerint (1997) alapvetően két okra vezethető vissza:

- a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására, illetve
- a betonfelület réteges leválására.



2.1. ábra: Kvarckavics adalékanyagú beton (20 °C mikroszkópos felvétel)

Ezekbe beleértendőnek érezzük a melegítés során kialakuló belső mikrorepedéseket is. A cementkőben és a betonban hőmérsékletváltozás hatására lejátszódó kémiai folyamatok alakulását termoanalitikai módszerekkel (TG/DTG/DTA) vizsgálhatjuk. A TG (termogravimetriás) és a DTG (derivált termogravimetriás) görbék segítségével a tömegváltozással járó átalakulások mennyiségi elemzése lehetséges. A DTA (differenciál termoanalízis) görbékkel nyomon követhetjük a mintákban a hőmérséklet növekedésének hatására bekövetkező exoterm (hőtermelő) vagy endoterm (hőelnyelő) folyamatok alakulását.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ *(Thielen, 1994):*

- a cement típusától,
- az adalékanyag típusától,
- a víz-cement tényezőtől,
- az adalékanyag-cement tényezőtől,
- a beton kezdeti nedvességtartalmától,
- a hőterhelés módjától.

3. A FEJLESZTÉSRE SZÁNT ELEMEK BEMUTATÁSA

A tűzállóság fokozása tekintetében 5 különböző szerkezeti elem fejlesztését tűztük ki célul, melyeket a következő fejezetekben mutatunk be előbb gyártástechnológiájuk majd betonreceptúrák szerint csoportosítva.

3.1 A gyártási technológia sajátosságainak ismertetése

A *3.1 táblázatban* foglaltuk össze a fejlesztésre szánt elemeket és azok gyártástechnológiáját.

3.1.1 Öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel (falpanelelemek, TT panel)

A megfelelő betonreceptúra kiválasztásához több különböző szempontot kell figyelembe vennünk. Elsősorban fontos a szilárdsági paraméterek változása a hőmérséklet függvényében, másrészt fontos, hogy szobahőmérsékleten legalább ugyan azoknak a követelményeknek tudjon megfelelni a kiválasztott receptúra, mint aminek az etalon receptúra megfelel. A kiválasztásnál mérvadó, hogy magas hőmérsékleten a betonok szívósabbak legyenek, és ebben az esetben ne veszítsék el teljesen a szerkezeti egységüket, továbbá a várható leromlásuk ne gyorsan, hanem

fokozatosan, időben elnyújtva következzen be. Mindezek mellett meg kell felelni a gyártási és gazdaságossági követelményeknek is.

A betonrecept módosítása során az eredeti recepthez 1 kg/m³ polipropilén műanyag szálat adagoltunk. A gyártó kérése alapján a recept módosítása során figyelembe vettük a gyárthatóságot is, és technológiailag ez a megoldás tűnt a legkedvezőbbnek. Szükség esetén további tűzállósági határérték növelés száladagolással, a mészkőliszt kohóslakra történő cseréjével és cementváltással érhető el.

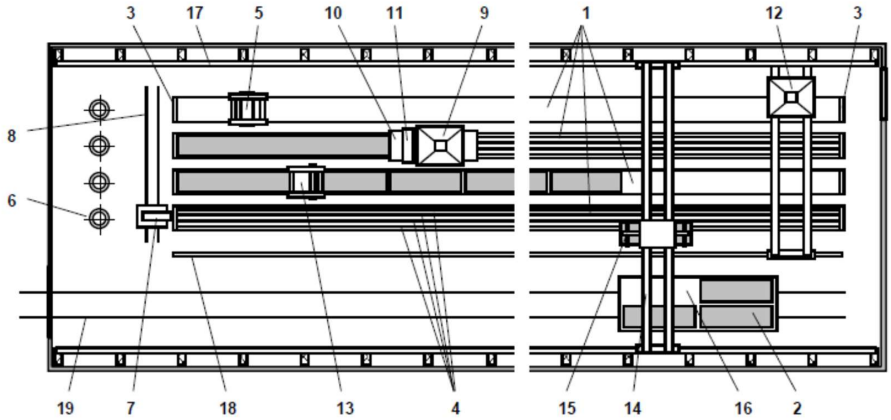
3.1. táblázat: A vizsgált termékek és a hozzájuk tartozó gyártástechnológia

Fejlesztés sorszáma	Fejlesztendő elem	Hozzá tartozó gyártás technológia
1. Tűz	200 mm magas előfeszített vasbeton körüreges födémpanel (MF 200)	Hosszúpályás gyártási technológia extruderes betonsajtolással, pályafűtéssel 12-16 órás érlelési idővel. (Feszítési feszültség termékre engedése, majd a termék vágása)
2. Tűz	265 mm magas előfeszített vasbeton körüreges födémpanel (MF 265)	Hosszúpályás gyártási technológia extruderes betonsajtolással, pályafűtéssel 12-16 órás érlelési idővel. (Feszítési feszültség termékre engedése, majd a termék vágása)
3. Tűz	Feszített egyrétegű falpanel (SWALL)	Öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel, sablonfűtéssel vagy anélkül, 12-16 órás érlelési idővel és feszültség ráengedéssel.
4. Tűz	Lágyvasas szendvics szerkezetű falpanel	Öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel, sablonfűtéssel vagy anélkül, 12-16 órás érlelési idővel és feszültség ráengedéssel.
5. Tűz	Feszített szendvics szerkezetű falpanel (SWALL) betonja	Öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel, sablonfűtéssel vagy anélkül, 12-16 órás érlelési idővel és feszültség ráengedéssel.
6. Tűz	TT panel, mint alulbordás előfeszített vasbeton födémelem (SWEEP)	Öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel, sablonfűtéssel vagy anélkül, 12-16 órás érlelési idővel és feszültség ráengedéssel.

3.1.2 Hossszúpados, extrúderes gyártási technológia ismertetése (MF200, MF265)

A *3.1. ábrán* az ELEMATIC cég által kifejlesztett, és szabadalmaztatott hosszúpados, extrúderes gyártási technológia elrendezési vázlata látható. Ezzel a gyártási rendszerrel 1200 mm széles, 160–400 mm magas, üreges feszítettbeton födémpallók gyárthatók, 20 - 24 m hosszúságig.

Az egymás mellett elhelyezett 120 - 150 m hosszú, acéllemez burkolattal ellátott gyártópadok (1) alatt helyezik el az elemek (2) hőkezelésére szolgáló melegvizes fűtőcsöveket. Az egyes technológiai berendezések a gyártópadok két oldalán lefektetett sínpályákon mozognak. A gyártósorok mindkét végén feszítőbakok (3) találhatók, ezekhez, feszítés után ékkel rögzítik ez egyes pászmavégeket (4).



3.1. ábra: Hosszúpados, extrúderes gyártási technológia 1. gyártópadok; 2. betonelem; 3. feszítőbak; 4. feszítőpászma; 5. tisztító-, olajozógép; 6. pászma tekercs; 7. feszítőgép; 8. keresztirányú sínpálya; 9. betontartály; 10. bedolgozógép (extrúder); 11. felületi simító; 12. beton kiszállítókocsi; 13. gyémánttárcsás darabológép; 14. híddaru; 15. hidraulikus emelőhimba; 16. elem kiszállítókocsi; 17. darupálya; 18. alsó sínpálya (beton kiszállítókocsihoz); 19. kiszállítópálya

A gyártási folyamat a pad tisztításával, olajozásával, majd a feszítőpászmák kihúzásával kezdődik. Ezt a műveletsort egy univerzális tisztító-, olajozógép (5) végzi, amely először egy forgó kefe segítségével egy konténerbe összegyűjti a padon maradt törmeléket, majd formaleválasztó olajréteget permetez a felületre. Ezen a berendezésen a feszítőpászma végek megfogására alkalmas befogógerendát is elhelyeznek, melynek segítségével előremenetben (*3.1. ábrán*: balról jobbra) kihúzza a tároló dobokról (6) a pászmákat, majd a pászmavég rögzítése (3) után, visszamenetben elrendezi („megfésüli") azokat. Ez utóbbi művelet közben kismértékben elő is feszíti a pászmákat, ezzel biztosítva a csoportos feszítéshez szükséges azonos huzalhosszt.

A feszítőpászmákat egyszerre feszítik meg, a gyártópadok végén elhelyezett keresztirányú sínpályán?hoz? (8) mozgó berendezéssel (7), de erre a műveletre egyedi feszítő puskák is alkalmazhatók. A csoportos feszítés előtt a huzalvégeket egy közös befogókeretben, önzáró ékekkel rögzítik, majd azt csatlakoztatják a mobil feszítő berendezéshez. Egyedi feszítéskor természetesen a pászmavégeket is egyedileg kell rögzíteni.
A beton bedolgozását végző extrúder fogadótartályának (9) feltöltését – a helyi körülményektől függően – vagy felsőpályás, vagy félportál rendszerű (12) betonszállító kocsi végzi, amely a betongyár kiszállító rendszerétől veszi át az anyagot. A csavarsajtoló egység (10) a puttony kiömlőnyílásához csatlakozik, így az abból kiáramló betont a csavarsajtók közvetlenül a csúszózsalu tömörítőterébe préselik. Az üregképző sablonok (dugók) a csavarsajtók hossztengelyében helyezkednek el, így a sajtó az üreg köré préseli a betont. A csigaprés nyomása a sablon kitöltése közben végig hat a betonra, így annak reakcióereje a bedolgozógép folyamatos előrehaladását is biztosíthatja. A tömörítőteret felülről és oldalról simítólapok (11) határolják, melyek alternáló, ill. döngölő mozgással simítják el az elemek felszínét.

Sajtolás után a nyers termék felszínén (közvetlen méréssel, vagy e célra kialakított plotterrel) bejelölik kívánt hosszméreteket, majd a gyártópad melletti sínpályán mozgó tekercselőkocsi segítségével, vízhatlan ponyvával takarják le az elkészült nyers elemeket. Ezt követően a

gyártópadba beépített fűtőcsövekbe melegvizet vezetnek, és 6 - 8 órán keresztül hőérlelik az elemeket.

Az előírt szilárdulási idő elteltével a ponyvát visszatekercselik, majd egy gyémántszemcsés vágókoronggal ellátott, önjáró berendezéssel (13) méretre vágják az elemeket. A darabológép nemcsak keresztirányú, hanem ferde síkú, valamint hosszirányú vágásra is alkalmas.

A darabolás után a termékkiszállító híddaru (14) választja el az elemet a gyártópadtól, majd helyezi el a kiszállítókocsira (16). A termékek megfogását és emelését hidraulikus emelőhimba (15) végzi, melynek hosszmérete az elemhossznak megfelelően változtatható.

A termék gyártása során csak adott konzisztenciájú betonnal lehet a terméket gyártani. Ezen technológia a roskadási mérőszámú, S1-es osztály, vagyis 10-40 mm-ig roskadó betonra alkalmazható. Tekintettel erre, ezen betonok konzisztenciáját roskadás méréssel kell meghatározni.

A gyártás során a betonnak kellő zöld szilárdsággal és állékonysággal kell rendelkeznie, hogy a folyamatosan mozgó gyártó gép által hátrahagyott betonelem ne roskadjon össze, a méretpontosság biztosítható legyen, elváljon a géptől a betonkeverék, esztétikus, sima végfelületet kapjunk.

A projekt kapcsán a 200 mm magas előfeszített vasbeton körüreges födémpanelt gyártják ezzel a technológiával. Az MF200 körüreges födémpalló betonja C50/60-XC1-11-S1 ("100205"). Jelen fejlesztés célja a tűzállóság fokozása, lehetőség szerint a geometria és betontakarás változtatása nélkül. A körüreges födem pallók jelenleg 2003-as ÉMI-ben történt tűzvizsgálat alapján üzemi teher esetében 60 perces, ipari terhelésnél (5 kN/m^2) 90 perces tűzállósági határértékkel rendelkeznek. Az elő és köztes kísérletek alapján ez a födém palló azonban 30 percnél alacsonyabb tűzállósági határértékkel rendelkezik. A födémpallók gyártástechnológiájának, geometriájának és betonösszetételének teljeskörű vizsgálatára van szükség.

Tekintettel arra, hogy az ismertetett gyártási technológia elég kötött, ezért a geometria változására nincs lehetőség, pedig véleményünk szerint erre szükség lenne. A gyártó kérésére, egyelőre az adalékanyag lecserélésére kerül sor, sem kiegészítőanyag adagolás, sem műanyagszál adagolás nem történik a betonkeverékhez, mert ez számottevő nehézséget jelentene a gyártás során.

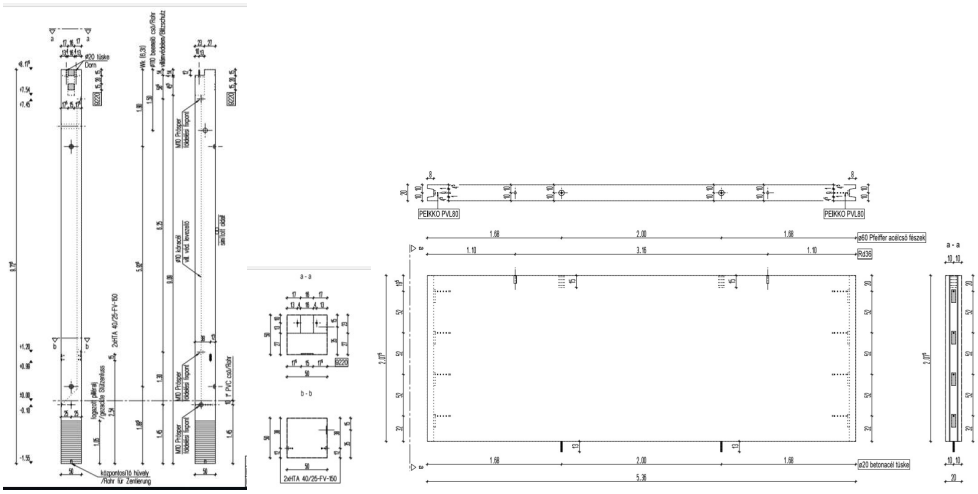
3.2 A fejlesztésre szánt elemek és azok kiindulási receptúrájának bemutatása

3.2.1 Falpanelelemek

3.2.1.1 Egyrétegű falpanel

Az egyrétegű falpanel két szerkezeti elemből áll: oszlopból és panelelemből. Az oszlopok 50 × 50 cm keresztmetszetűek. A panelelem 5,36 m × 2,0 m × 20 cm méretű. A szerkezeti kialakítás a *3.2 ábrán* látható.
Az oszlop adatai:
A betonfedés: 25 mm
Alkalmazott anyagok:

Betonacél: B500B
Feszítőpászma: Y 1860 S7-12,5
Beton: C40/50-XC2-16-F3
A panelelem adatai:
A betonfedés: 25 mm
Alkalmazott anyagok:
Betonacél: B500B
Feszítőpászma: Y 1860 S7-12,5
Beton: C30/37-XC2



3.2 ábra: A falpanel geometriai méretei (gyártói adatszolgálatatás)

Falpanelelem gyártása öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel, szükség esetén sablonfűtéssel.12-16 órás érlelési idővel.
Az egyrétegű falpanelek egy kisebb (C30/37) és egy nagyobb szilárdságú (C50/60) betonból

3.2.1.2 Kétrétegű falpanel

A kétrétegű falpanel két szerkezeti elemből áll: oszlopból és panelelemből. Az oszlopok 40 × 40 cm keresztmetszetűek. A panelelem 5,36 m × 2,0 m × 20 cm méretű. A szerkezeti kialakítás a *3.3 ábrán* látható.
Az oszlop adatai:
A betonfedés: 30 mm
Alkalmazott anyagok:
Betonacél: B500B
Beton: C30/37-XC1-16-F3
A panelelem adatai:
rétegrend:

- 160 mm belső vasbeton kéreg (teherhordó)
- 120 mm URSA XPS N-III-PZ-I polisztirolhab hőszigetelés (ρ = 33-35 kg/m^3)
- 70 mm külső vasbeton kéreg

A betonfedés: 30 mm
Alkalmazott anyagok:
Betonacél: B500B

Feszítőpászma:	Y 1770S7-9,6 (teherhordó rétegben)
	Y 1860 S7-12,5 (kéregben)
Beton:	C40/50-XC3-16-F3 (teherhordó rétegben)
	C40/50-XC4-XD1-XF1-16-F5 (kéregben)

Falpanelelem gyártása öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel, sablonfűtéssel vagy anélkül (évszakonként eltérő) 12-16 órás érlelési idővel.
A kétrétegű falpanel betonösszetétele megegyezik az egyrétegű falpaneléval (de nagyobb szilárdságú).

3.2.2 TT panelelemek

A TT panel 1,73 m szélességű, 4,6 m hosszú 0,38 m magas, amin 0,09 m felbeton kerül elhelyezésre *(3.4 ábra)*.
A betonfedés: 25 mm
Alkalmazott anyagok:

Betonacél:	B500B
Feszítőpászma:	Y 1860 S7-12,5
Beton:	C50/60-XC3-16-F5

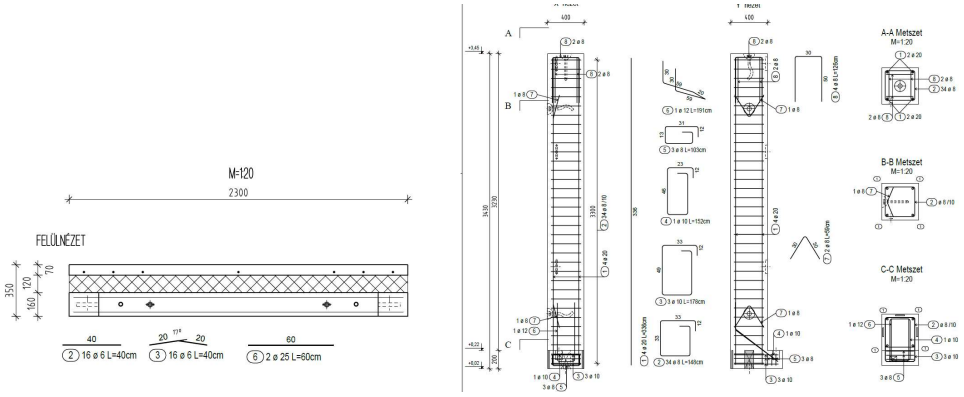
A szerkezet számított tűzállósága: R45

TT keresztmetszetű panel gyártása öntött technológia tűvibrátoros tömörítéssel, sablonfűtéssel vagy anélkül történik, 12-16 órás érlelési idővel.

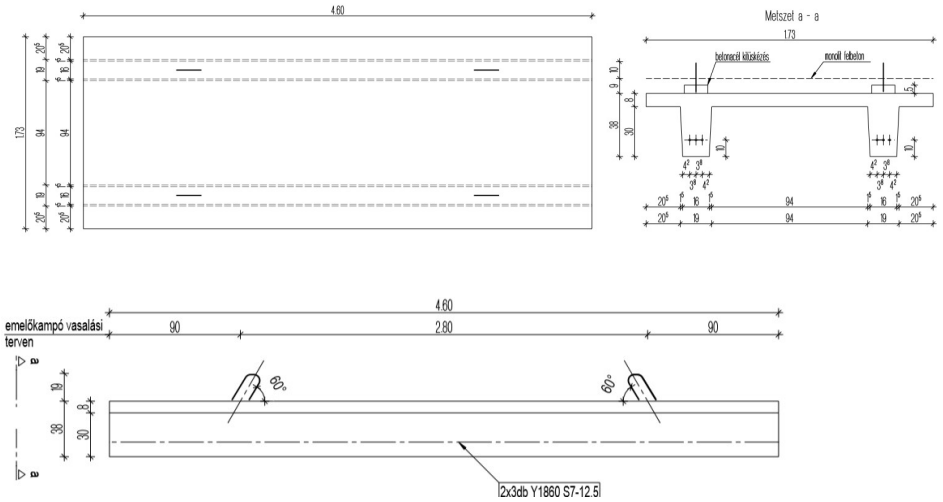
A TT panel, mint alulbordás előfeszített vasbeton C50/60 szilárdságú betonból készült.

3.2.3 Körüreges födémpallók

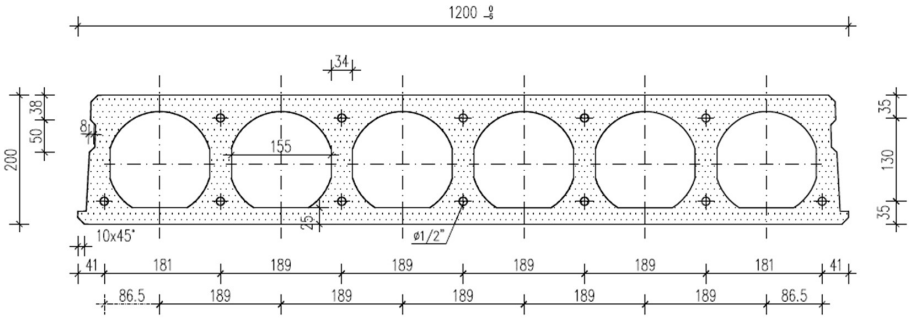
A körüreges födémpallók két jellemző keresztmetszetét a *3.5* és *3.6 ábrán* adjuk meg.



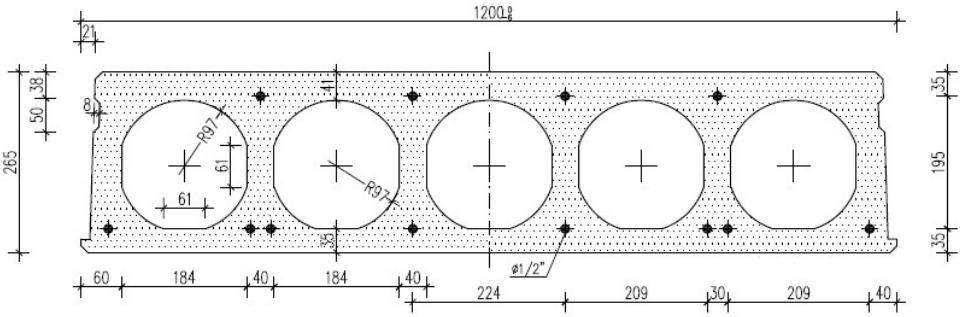
3.3 ábra: A falpanel geometriai méretei (gyártói adatszolgálatatás)



3.4 ábra: A TT panel geometriai méretei (gyártói adatszolgálatatás)



3.5. ábra: Az M200-as körüreges födémpalló szerkezeti rajza



3.6. ábra: Az M265-ös körüreges födémpalló szerkezeti rajza

M1 beton a 200 és 265 mm magas előfeszített vasbeton körüreges födémpanel (MF 200) betonja.

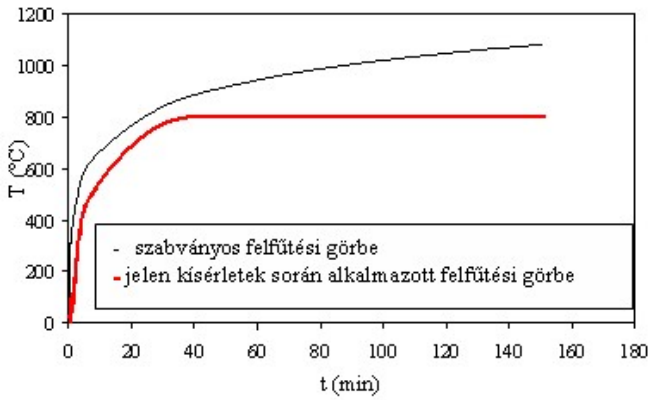
Gyártása hosszúpályás gyártási technológia extruderes betonsajtolással, pályafűtéssel 12-16 órás érlelési idővel történik. Először a feszültség termékre engedése, majd vágása történik meg. Az elemeket C50/60 szilárdságú betonból készítettük.

4. ALKALMAZOTT VIZSGÁLATI MÓDSZER BEMUTATÁSA

4.1 Kiselemes próbatestek vizsgálata

4.1.1 Tűz modellezésének kérdései

A kísérleteink során a szabványos (standard), vagyis a magasépítési szerkezetekre és a csarnokokra alkalmazható tűzgörbéhez közeli felfűtési görbét alkalmaztunk (*4.1. ábra*).



4.1. ábra: A kísérleteinkhez alkalmazott felfűtési görbe és a szabványos tűzgörbe

A próbatesteket két órán át a kísérleti tervben megadott maximális hőmérsékleten (50 °C, 150 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 800 °C) tartottuk. A kétórás hőterhelés után, a próbatesteket hagytuk labor hőmérsékelten kihűlni, majd szobahőmérsékleten vizsgáltuk (*4.2. ábra*).

4.1.2 A próbatestek vizsgálat előtti előkészítése

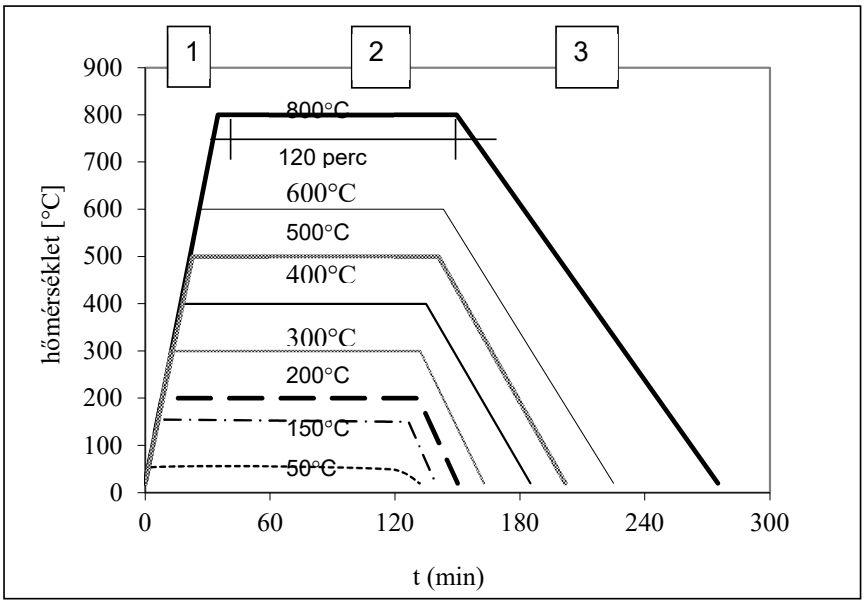
A próbatesteket a kizsaluzás után 7 napig vízben tároltuk, majd a hőterhelésig (28 napos korig) laboratóriumi körülmények között, laboratóriumi hőmérsékleten tartottuk.

4.1.3 A megszilárdult cementpép a beton és nyomószilárdságának vizsgálata

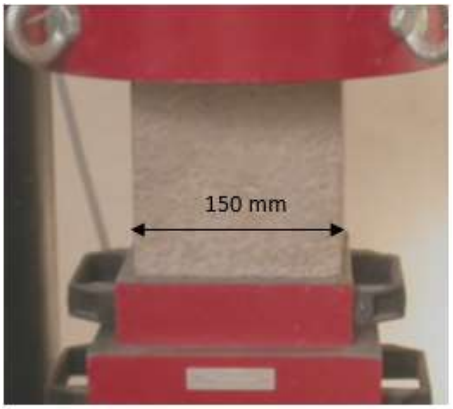
A nyomószilárdság vizsgálatát betonból készült kockákon végeztük el (*4.3. ábra*). A betonkockák élhosszúsága 150 mm volt. A betonkockákat törési vizsgálatát ALPHA 3-3000S típusú törőgéppel végeztük.

4.1.4 A beton hajlító-húzószilárdságának vizsgálata

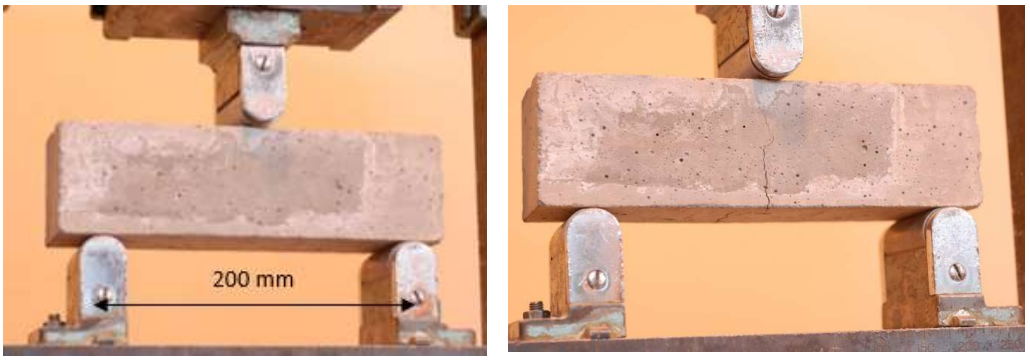
A beton hajlító-húzószilárdságát 70×70×250 mm élhosszúságú, fekve betonozott hasábokon mértük. A hajlító-húzószilárdság mérését WPM ZDM 10/91 típusú törőgépen végeztük el *(4.4. ábra).*



4.2. ábra: A kísérleteink során alkalmazott hőterhelési görbék sematikus ábrázolása *(1 felfűtés, 2 hőntartás, 3 lehűlés)*



***4.3. ábra**: A beton kockák törési vizsgálata*



4.4. ábra: *A hajlító-húzószilárdság vizsgálatának módja*

4.2 Nagyelmes próbatestek vizsgálata

4.2.1 Falpanelek vizsgálata

A pillérek közé épített vasbeton falszerkezet (egyrétegű és kétrétegű) tűzállósági határérték vizsgálatai az MSZ EN 1365-1:2013 szabvány előírásai szerint történtek.

A vizsgálatok során alkalmazott szabványos tűzhatás az MSZ EN 1363-1:2013 szerinti volt.
A vizsgálatok során az MSZ EN 1365-1:2013 előírásainak megfelelően az egyrétegű vasbeton falszerkezetek tűzmentett oldalának felületére 16-16 db, a falszerkezetek melletti 1-1 db teherhordó vasbeton pillér felületére az 1. vizsgálat alkalmával összesen további 7 db, a 2. vizsgálat alkalmával összesen további 8 db Ni-CrNi hőelem került felszerelésre.

A pillérekből és falpanelekből álló falszerkezetek tűzállósági vizsgálatát a pillérek hossztengelyében a tűzhatással egyidejűleg működtetett terhelés mellett folytattuk le.
A megbízó adatszolgáltatása alapján egy pillér középpontos terhelésének mértéke a tűzállósági szempontból mértékadó nagyságú, 10 kN volt.

A gyártó szakemberei két vasbeton pillért helyeztek el a laboratórium által biztosított acél vizsgálókeretbe, majd lapos acélokkal és L alakú acél profilokkal rögzítették azokat a keret alsó részéhez.

Ezt követően helyezték el a 400 × 400 mm keresztmetszetű és 3450 mm magas pillérek közé az egyrétegű, 200 mm vastag vasbeton falpaneleket.
A falpanelek méretei:

- alsó falpanel: 1800 × 1230 mm
- középső falpanel: 1800 × 1230 mm
- felső falpanel: 1800 × 950 mm

4.2.2 Homlokzatvizsgálat

Homlokzat vizsgálatokat csak a kétrétegű falpanelelemeken szendvicspanelokon) végeztünk, mivel az egyrétegű panelelemeket nem tartalmaztak éghető anyagot. A szendvicspaneleket egyedi, oválfuratokkal ellátott acélszerelvényekkel és menetes szárakkal rögzítették a modellépülethez 10 helyen.

A vizsgálaton SWALL feszített szendvics szerkezetű vasbeton falpanel került alkalmazásra. Legnagyobb vizsgált elem szélessége: 5339 mm, magassága: 2900 mm.

A panelek kiosztása: A modell 3 panelből állt, az alsó és a középső elem ablaknyílással készült. Az alsó panelillesztés a tűztér mennyezeti födém alsó síkjához illeszkedett, a felső panelillesztés kb. a megfigyelőtér felső harmadába esett, így a két ablak közötti szakaszra egyetlen panelillesztés került.

A szendvicspanelek egymáshoz történő rögzítését illesztésenként 2 db rögzítő tüske biztosította. Az alsó elem konzolját a tűztéri padlófödémre ültették rá. A teljes felületi felfekvést a födémre felhordott ST line Cementesztrich E20 anyaggal biztosították. A szerkezeti elem vízszintes helyzetbe történő pozícionálását acéllapok segítségével oldották meg.

Nyílászáró (ablak) helyzete: A hőszigetelés külső síkjához illesztve került beépítésre. A nyílászárót Soudal Soudafoam Purhabbal építették be a szendvicspanel szerkezetbe, mechanikai rögzítés (csavar) alkalmazásával.

A nyílások kávájának beltéri felületére körben 15 mm vastag Knauf GKF (DF) 15 gipszkartont helyeztek el Siniat ragasztógipsz felhasználásával, a külső éleket alumínium élvédő profillal lezárva és FinoBello gipszes glett anyag fedéssel ellátva. A gipszkarton és az ablak csatlakozását HILTI CFS-S SIL tűzvédelmi rugalmas tömítőmasszával zártak le. Az ablaktok és a falpanel csatlakozást a külső oldalon szintén HILTI CFS-S SIL tűzvédelmi rugalmas tömítőmasszával zárták le.

A feszített, szendvics szerkezetű falpanel az MSZ 14800-6:2009 szabványban meghatározott előírások alapján, az ott megjelölt kritériumok figyelembevételével, speciális, háromszintes vasbeton szerkezetű vizsgáló objektumon végeztük el. A vizsgáló objektum földszintje a tűztér, két további szintje a megfigyelőtér.

A födém és a falpanel csatlakozása mentén történő lángáttörés megállapítása érdekében kiegészítő hőelemeket alkalmaztunk a szabványos vizsgálati eljárásban meghatározottakon felül.

4.2.3 Födémvizsgálat

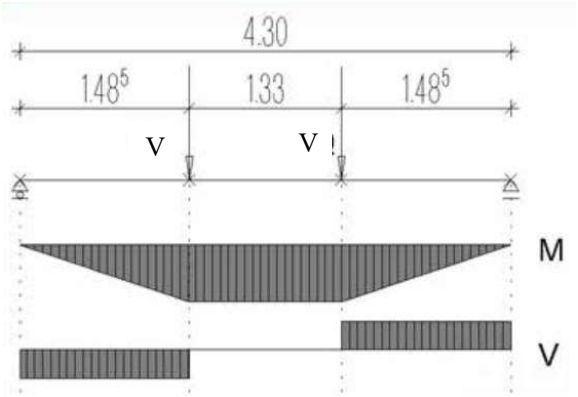
A tűzállósági vizsgálat az MSZ prEN 1365-2:2012 szabvány szerint történt, figyelembe véve az MSZ EN 1365-2:2015 szabvány előírásait is.

A vizsgálat során alkalmazott szabványos tűzhatás az MSZ EN 1363-1:2013 szerinti volt. A vizsgálat során a prEN 1365-2:2012 (visszavont) szabvány, és az MSZ EN 1365-2:2015 szabvány előírásainak megfelelően az alulbordás, előfeszített vasbeton födémelem (TT panel) tűzmentett oldalának felületére 5 db Ni-CrNi hőelem került felszerelésre: 1 db a felület mértani középpontjában (F-01. jelű), 1-1 db pedig a felület negyedeinek mértani középpontjában (F-02 – F-05. jelű).

A gyártás során a 4600 × 1730 × 380 mm méretű vasbeton TT födémelem 80 mm vastag vízszintes részét 90 mm vastag monolit vasbeton réteggel (felbetonnal) látták el.
A TT födémelem tűzállósági vizsgálatát a fesztáv harmadaiban a tűzhatással egyidejűleg működtetett terhelés mellett folytattuk le. A megbízó adatszolgáltatása alapján a a tűzállósági szempontból mértékadó nagyságú, 139,0 kN (2 × 69,5 kN) erő volt.

A terhelést 4 db hidraulikus henger segítségével biztosítottuk a vizsgálat megkezdése előtt 15 perccel.

A statikai modell kéttámaszú tartó volt két ponton bevezetett terheléssel (*3.5 ábra*), az a tartót érintően két erőt jelent. A terhelő erő értéke Q = 35,85 kN volt. Ezzel a terheléssel a tartó tűz estén alkalmazható maximális terhelhetőségét határoztuk meg.



4.5 ábra: A vizsgálatnál alkalmazott statikai modell

5. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSE

5.1 Falpanelelemek

5.1.1 Egyrétegű falpanelelem

Jelentésünben az egyrétegű falpanel tűzállóság növelésének módszereit mutatjuk be.

A C30/37 – XC4 -16 – F5 szabványos jelölésű betonoknál a receptúra az alábbiakban változott az etalon receptúrákhoz képest:

- pórusképző adalékszer hozzáadásával,
- mészkőliszt helyettesítése kohósalakkal, pórusképző adalékszer hozzáadásával,
- próruskép adalékszer és műanyagszál hozzáadásával,
- mészkőliszt helyettesítése kohósalakkal, pórusképző adalékszer és műanyagszál hozzáadásával
- műanyagszáladagolás.

A pórusképző adalékszer fagyállóság fokozása végett került hozzáadásra a receptekhez. Az NVKP_16-1-2016-0019 projekt keretein belül a tűzállóság fokozásán kívül cél a fagyállóság és a kémiai ellenállóképesség fokozása is.

A C50/60 – XC1 -16 – F5 szabványos jelölésű betonoknál a receptúra egy magasabb szilárdságú etalon receptúrától eltérő keverék, melynek módosulatait az alábbiak:

- a magasabb szilárdságú módosulatba kiegészítőanyagként mészkőliszt kerül,
- a magasabb szilárdságú módosulatba kiegészítőanyagként kohósalak kerül,
- a magasabb szilárdságú módosulatba kiegészítőanyagként kohósalak, továbbá műanyagszál kerül.
- a magasabb szilárdságú módosulatba műanyagszál kerül.

A betonrecept módosítása során az eredeti recepthez 1 kg/m^3 műanyag szálat adagoltunk. A gyártó kérése alapján a recept módosítása során figyelembe vettük a gyárthatóságot is, és technológiailag ez a megoldás tűnt a legkedvezőbbnek. Szükség esetén további tűzállósági határérték növelés száladagolással, a mészkőliszt kohósalakra történő cseréjével és cementváltással érhető el.

Beton vizsgálat eredményei

Az etalon összetétel esetén az 500 °C-os hőterhelés hatására a betonkockák a kemencében felrobbantak. Ez arra utal, hogy a nagyelemes kísérletek során a betonfelület robbanásszerű leválásának az esélye elég nagy. Ezt a későbbi nagyelemes vizsgálatok is alátámasztották, ugyanis a falpanelelemek felületén a beton levált. A műanyagszállal készült összetétel esetén a próbatestek nem robbantak fel, ez arra utal, hogy a nagyelemes kísérletnél is kisebb a betonfelület leválásnak az esélye. Megállapíthatjuk, hogy az 400 °C-os hőterhelés után a műanyagszállal készült beton nyomó és hajlító-húzó- szilárdsága alacsonyabb, mint az etalon betoné, amit feltehetőleg a műanyagszálak kiégésével magyarázhatunk.

Falpanel vizsgálat eredményei

Az egyrétegű falpanel modell tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűztéri oldalán a beton lepattogzása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, a lepattogzás mértéke a 2. vizsgálat során kisebb volt (mind a felületi kiterjedését mintegy 30%, mind a mélységét tekintve a fele, az 1. vizsgálat hasonló adataihoz viszonyítva), így a 2. vizsgálat után nagyobb vastagságú falpanel maradt meg, amely tény egyúttal magyarázza az alsó, a középső és a felső panelek alacsonyabb felületi hőmérséklet-emelkedését, továbbá a legkisebb és a legnagyobb hőmérséklet-emelkedési értékek közötti szűkebb tartományt, a fentiek alapján a 2. vizsgálat során a beton magas hőmérsékleten mutatott viselkedése kedvezőbb volt, amelynek következtében magasabb tűzállósági határértéket lehetett elérni.

Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 90 volt. A módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 120 perecre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a falakra való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 120, ezért az elem további javítását nem tervezzük.

5.1.2 Kétrétegű falpanel

A kétrétegű falpanel modell tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűztéri oldalán a beton lepattogzása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, a lepattogzás mértéke a 2. vizsgálat során kisebb volt, így a 2. vizsgálat után nagyobb vastagságú falpanel maradt meg, amely tény egyúttal magyarázza az alsó, a középső és a felső panelek alacsonyabb felületi hőmérséklet-emelkedését, továbbá a legkisebb és a legnagyobb hőmérséklet-emelkedési értékek közötti szűkebb tartományt, a fentiek alapján a 2. vizsgálat során a beton magas hőmérsékleten mutatott viselkedése kedvezőbb volt, amelynek következtében magasabb tűzállósági határértéket lehetett elérni.

A tűzállósági határérték jelentős növekedéséhez az is hozzájárult, hogy a panel illesztéseket a következőképpen alakítottuk ki:

A gyártó szakemberei először a két vasbeton pillért helyezték el a laboratórium által biztosított acél vizsgálókeretbe, majd lapos acélokkal és L alakú acél profilokkal rögzítették azokat a keret alsó részéhez.

Ezt követően helyezték el a pillérek közé a szendvics szerkezetű, 350 mm vastag vasbeton falpaneleket. A pillérek és a panelek közötti illesztéseket Tytan Professional B1 PUR habbal töltötték ki. A panelek vízszintes illesztésénél Hilti CFS-S SIL rugalmas

tűzvédő masszát és mögötte Rockwool Steprock ND kőzetgyapot hőszigetelést ($\rho = 120$ kg/m^3) alkalmaztak.
A panelek körüli illesztéseket MAPEFILL előkevert kiöntőhabarccsal, betonjavító habarccsal tömítették.

Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 90 volt. A módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 180 perecre módosult. Természtesen az ilyen mértékű határérték növekedéshez a megfelelő illesztések kialakítása is elengedhetetlen. Jelenleg (OTSZ, 2011) a falakra való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 180, ezért az elem további javítását nem tervezzük.

A homlokzat vizsgálat során az etalon és a módosított recepttel is a maximális 60 percet értük el.

5.2 TT panelek

C50/60-XC3-16-F5 szabványos jelölésű betonoknál a receptúra egy magasabb szilárdságú etalon receptúrától eltérő keverék, melynek módosulatait az alábbiak:

- a keverékhez műanyagszál kerül,
- cement lecserélése CEM II/A-S 42,5 N és metakaoilin adagolása,
- cement lecserélése CEM II/A-S 42,5 N és szilikapor adagolása,
- cement lecserélése CEM II/A-S 42,5 N és kohósalak adagolása.

A betonrecept módosítása során az eredeti recepthez 1 kg/m^3 műanyag szálat adagoltunk. A gyártó kérése alapján a recept módosítása során figyelembe vettük a gyárthatóságot is, és technológiailag ez a megoldás tűnt a legkedvezőbbnek. Szükség esetén további tűzálósági határérték növelés száladagolással, a mészkőliszt kohóslakra történő cseréjével és cementváltással érhető el.

Beton vizsgálat eredményei

Az etalonbeton összetétel esetén az 500 °C-os hőterhelés hatására a betonkockák a kemencében felrobbantak. Ez arra utal, hogy a nagyelemes kísérletek során a betonfelület robbanásszerű leválásának az esélye elég nagy. Ezt a későbbi nagyelemes vizsgálatok is alátámasztották, ugyanis a falpanelelemek felületén a beton levált. A műanyagszállal kevert összetétel esetén a próbatestek nem robbantak fel, ez arra utal, hogy a nagyelemes kísérletnél is kisebb a betonfelület leválásnak az esélye. Megállapíthatjuk, hogy az 400 °C-os hőterhelés után a műanyagszál a beton nyomó és hajlító-húzószilárdsága alacsonyabb, mint az etalon betoné, amit feltehetőleg a műanyagszálak kiégésével magyarázhatunk.

TT panel vizsgálat eredményei

Az etalon vizsgálata után az elbontás során látható lett, hogy a támaszok között a födém alsó síkjáról a betonréteg lepattogzott (néhol a vasalás alsó síkjáig 8 cm mélyen) és a vasalás szabaddá vált.
A módosított recepttel készült TT elem vizsgálata után az elbontás során látható lett, hogy a támaszok között a födém alsó síkjáról a betonréteg lepattogzott (néhol a vasalás alsó síkjáig 5 cm mélyen) és a vasalás szabaddá vált.

A födempanelek tűztéri oldalán a beton lepattogzása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, azonban annak mértéke a 2. vizsgálat során jelentősen kisebb volt, így a 2. vizsgálat után nagyobb vastagságú felső felület maradt meg, amely tény egyúttal magyarázza az előző pontban leírt, kisebb mértékű hőmérséklet-emelkedést és egyben a nagyobb tűzállósági határértéket.

Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 60 volt. A módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 90 perecre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a födémekre való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 90, ezért az elem további javítását nem tervezzük.

5.3 Körüreges födempanelek

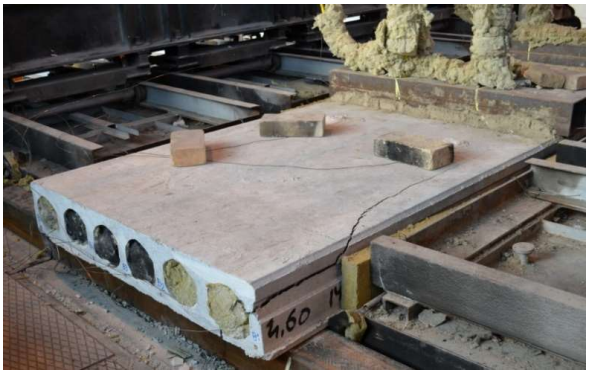
A C50/60 – XC1 -11 – S1 szabványos jelölésű betonoknál a receptúra az alábbiakban változott az etalon receptúrákhoz képest:

- a mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk,
- mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk és 30 kg/m^3 kohósalak kiegészítőanyagot használtunk,
- a mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk, 30 kg/m^3 kohósalak kiegészítőanyagot és 1 kg/m^3 műanyagszálat használtunk,
- a mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk és kicseréltük CEM I 42,5 R-es cementet CEM II A-S 42,5 N cementre,
- a mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk és kicseréltük CEM I 42,5 R-es cementet CEM II A-S 42,5 N cementre, valamint 30 kg/m^3 metakaoilin kiegészítőanyagot alkalmaztunk,
- a mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk és kicseréltük CEM I 42,5 R-es cementet CEM II A-S 42,5 N cementre, valamint 30 kg/m^3 szilikapor kiegészítőanyagot alkalmaztunk,
- a mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk és kicseréltük CEM I 42,5 R-es cementet CEM II A-S 42,5 N cementre, valamint 30 kg/m^3 kohósalak kiegészítőanyagot alkalmaztunk,
- a mészkőadalékanyag helyett andezitet használtunk és kicseréltük CEM I 42,5 R-es cementet CEM II A-S 42,5 N cementre, valamint 30 kg/m^3 kohósalak kiegészítőanyagot és 1 kg/m^3 műanyagszálat alkalmaztunk.

A födém tűzállósága üzemi terhelésre REI 15.

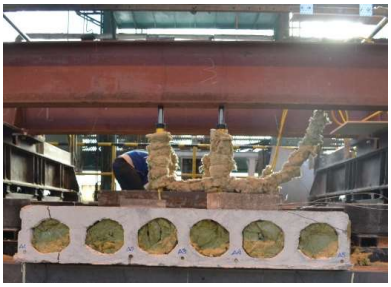
A tűzterhelés alatt a körüreges födempallókon látható károsodásokat fényképekkel dokumentáltuk. A tűzvizsgálat alatt a következő megállapításokat tesszük:

1. A körüreges födempalló felemelésre kialakított elkeskenyített részen megjelent egy repedés (*5.1 ábra),* a tűzvizsgálat 5-6 percében.

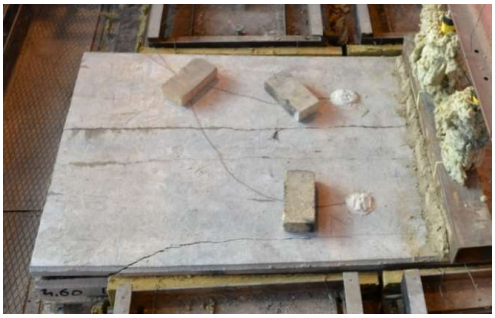


5.1 ábra: Az M200-as körüreges födempalló első repedése a tűzvizsgálat 5-6 percében (2017. 12.07)

2. A tűzvizsgálat 14 percében megjelenek az első hosszirányú repedések, amik 1,59-5,31 mm pászbehúzódással járnak *(5.2 ábra).* A repedések vagy a körüregek közepénél, vagyis a tartó legkisebb keresztmetszeti részénél, illetve a pászmák középpontjából kiindulva futnak. A pászmabehúzódás azt jeleni, hogy a pászmák tapadása lecsökken.







5.2 ábra: Az M200-as körüreges födempallón megjelenő hosszirányú repedések és pászma behúzódás (2017. 12. 07)

3. A körüreges födempallón vizaszintes repedések jelenek meg a tűzvizsgálat 18. percében (*5.3 ábra*).

A körüreges födémpallók vizsgálat során jelentősen eltérő tűzállósági határértékek adódtak 2007-ben és a 2017-ben, emiatt szükségesnek éreztük a két vizsgálat összehasonlítását. A betonelemekben és a vizsgálat módszerében való eltéréseket az *5.1 táblázatban* foglaltuk össze. Tekintettel arra, hogy a 2000-ben, illetve a 2017-ben végzett vizsgálatok tűzállósági határérték tekintetében jelentősen eltértek egymástól, ezért 2019-ben további vizsgálatokat végeztünk.
A következő változtatásokat végeztük el a vizsgálatok során:

1) adalékanyag cseréje andezitre,
2) más gyárból szállított termék vizsgálata,
3) eredeti dolomit adalékanyagos termék vizsgálata terhelés nélkül,
4) régi recepttel készült (kvarckavics adalékanyagú beton) szerkezet vizsgálata terhelés nélkül,
5) régi recepttel készült (kvarckavics adalékanyagú beton) szerkezet vizsgálata terhelés nélkül keresztirányú pántolással ellátva.



5.3 ábra: Az M200-as körüreges födémpallón megjelenő vízszintes repedések (2017. 12. 07)

A betonrecept módosítása során az eredeti recepthez képest első lépésben a dolomit adalékanyagot andezit adalékanyagra cseréltük le. A választásunkat a következők magyarázzák: az extruderes gyártástechnológia miatt az adalékanyagnak mindenképpen zúzott kőnek kell lennie. A Magyarországon kapható és beton adalékanyagként alkalmazható zúzott kövek közül az eredeti recept dolomit adalékanyaggal a módosított recept esetén andeztit és bazalt jött szóba.

Tekintettel arra, hogy a körüreges födémpallók a módosított recepttel 3 perccel a tűzterhelés kezdete után felhasadtak szükségesnek éreztük, hogy megvizsgáljuk a jelenség bekövetkeztének az okát.

Mivel a módosított recept csak az adalékanyagban tért el, ezért az adalékanyag hőterheléses vizsgálatát külön is elvégeztük. Kutatásaink során vizsgáltuk az adalékanyag áporodását, hőmérséklet függvényében bekövetkező kémiai átalakulását, szövetszerkezetének és szilárdságának (Hummel mozsár) változását. Az adalékanyag vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy bizonyos adalékanyag típusok érzékenyen reagáltak a hőterhelésre, ezeket az adalékanyagokat nem javasoljuk alkalmazni.

A vizsgálataink során a következő megállapításokat tesszük:

1) A szerkezet érzékeny az adalékanyag választásra, ezért a nagyelemes vizsgálatok előtt célszerű az adalékanyag és az alkalmazott betonösszetétel tűzállóságát megvizsgálni.
2) A kísérletek során a tartó keresztirányú alakváltozását meg kell akadályozni (két elem összeépítése, vagy pántolás).

Véleményünk szerint ezen tartó tűzállósági határértékét kizárólag a betonösszetétel megváltoztatásával nem lehet célszerűen megoldani, ezért a geometria módosítását javasoljuk, ennek számítására kidolgoztunk egy végeselemes-módszert.

A hőtechnikai modell kalibrációja során meghatároztuk az üregbe a repedések következtében bejutó többlet hőmérséklet terhet. A hőtechnikai modell kalibrációjánál az ÉMI-ben 2017.12.07-én végzett vizsgálat védett felületen elhelyezett termoelemek eredményeit használtuk fel.

5.1 táblázat: A 2007-es és 2017-es vizsgálatok összehasonlítása

	2007-es vizsgálat	**2019-es vizsgálat**
tűzállósági határérték	REI 60	REI 15
tartó kialakítása: **elem geometriája** **feszítőerő** **pászmakép**	ugyanaz	ugyanaz
betonösszetétel: **adalékanyag** **cement** **szilárdság**	 kvarc CEM II/A-P 32,5 N C40/50	 dolomit, andezit CEM I 42,5 N C50/60 (mért átlag szilárdság 90 N/mm^2)
kísérleti kialakítás **terhelés** **felfekvés** **üregek**	 megoszló+ központos (5 db 350 kg+ középen 16 kN) kőzetgyapotra nyitott	 középpontos (35,85 kN) betonelemre zárt

Az ÉMI-ben 2017.12.07-én végzett vizsgálat során az első repedések az alsó övön a 6. perben jelentek meg. A modell kalibrációjánál az első iterációs lépéseknél megvizsgáltuk a födém panel felső, tűztől védett felületének alakulását felhasználva a korábbi modellek eredményei közül azt az esetet amikor a 10. percben a tűz hőmérsékletének megfelelő teljes hőteher jut az üregbe. Továbbá megvizsgáltuk azt az esetet is, amikor nem jut többlet hő az üregbe és ott csak a felületek közti hősugárzás adja tovább a hőmérsékletet. Az így kapott eredményeket összehasonlítottuk a valós mérés eredményeivel.

Az eredményekből látható, hogy az első eset jóval fölé becsüli, míg a második eset jóval alábecsüli a mért hőmérsékletváltozásokat a födém felületén.

Az iterációs folyamat eredményeképp végül az üregben mért hőmérsékletből lett levezetve a modellben az üregben alkalmazott többlet hőteher mennyisége. A mért adatokhoz legjobb közelítést az az eset adta, amikor az üreg felületére az üregben mért hőmérséklet 0,666 szorosát alkalmaztuk hőteherként. A jelenség azzal magyarázható, hogy az üregben mért hőmérséklet két részből tevődik össze. Esetünkben 2/3 részt a repedésen keresztül bejutó gáz hősugárzásából és 1/3 részt az üregben a felületek hősugárzásából.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A 2017. március 1. és 2020. október 30. között *NVKP_16-1-2016-0019Fokozott ellenállóképeségű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése* című projekt keretén belül a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke kiterjedt kutatásokat végzet a a pályázatban tervebe vett szerkezeti elemek tűzállóságának fokozására.

A pályázat ide vonatokozó célja:

- *tűzhatásra olyan optimális betonösszetétel kifejlesztése, amit az előregyártás során megfelelő technológia mellett alkalmazni tudnak.*

A pályázat keretén belül a homlokzati falpanelelemek (egy és két rétegű), TT gerendák, illetve a körüreges födémpallók tűzállósági határérték növelését sikeresen elvégeztük.

Az egyrétegű falpanelelem esetén az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 90 volt. A módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 120 perecre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a falakra való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 120, ezért az elem további javítását nem tervezzük.

A kétrétegű falpanel elem esetén az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 90 volt. A módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 180 perecre módosult. Természtesen az ilyen mértékű határérték növekedéshez a megfelelő illesztések kialakítása is elengedhetetlen. Jelenleg (OTSZ, 2011) a falakra való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 180, ezért az elem további javítását nem tervezzük. A homlokzat vizsgálat során az etalon és a módosított recepttel is a maximális 60 percet értük el.

TT panel esetén az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 60 volt. A módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 90 perecre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a födémekre való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 90, ezért az elem további javítását nem tervezzük.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

8. FELHASZNÁLT IRODALOM

Kordina, K (1997): Über das Brandverhalten punktgestützter Stahbetonbalken, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

MSZ EN 1991-1-2:2005 Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások 1-2. rész: Általános hatások. A tűznek kitett szerkezeteket érő hatások (*NA is készült; magyar nyelven*)

MSZ EN 1992-1-2:2013 Betonszerkezetek tervezése. 1-2. rész: Általános szabályok. Szerkezetek tervezése tűzhatásra.

MSZ EN 1363-1:2003 Tűzállósági vizsgálatok. 1. rész: Általános követelmények.

MSZ EN 1365-1:2013 Teherhordó elemek tűzállósági vizsgálata. 1. rész: Falak

NVKP- 16 Fokozott ellenállóképeségű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) betonok fejlesztése pályázat részjelentései

OTSZ (2011) 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról

Thielen, K. Ch. (1994): Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

ELŐREGYÁRTOTT INFRASTRUKTÚRA ELEMEK FAGYÁLLÓSÁGA LÉGBUBORÉKKÉPZŐ SZEREK ÉS KIEGÉSZÍTŐ ANYAGOK ESETÉN KÜLÖNBÖZŐ SZABVÁNYOS VIZSGÁLATOKKAL

Nemes Rita
Szijártó Anna
Balázs L. György
Salem G. Nehme
BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1521 Budapest

SUMMARY

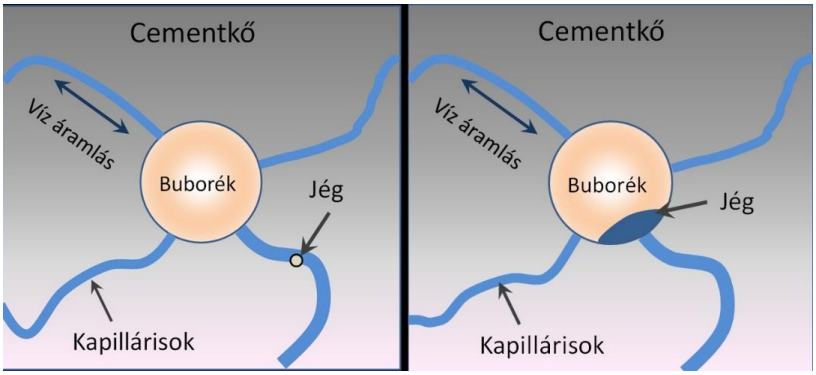
Nagy mennyiségben készülnek az előregyártásban fagynak erősen kitett elemek. Ezeket elsősorban az útépítésben használják fel. Az útépítési elemek fagyállóságát a nemzetközi szakirodalom és gyakorlat szerint légbuborékképző adalékszerrel célszerű készíteni. A magyar szabályok viszont tiltják a légbuborékképzők használatát a hídépítésben a tartószerkezeti elemek, pl. hídgerendák esetén. Ráadásul a légbuborékképző használata nagy körültekintést igényel, mert mind a konzisztencia, mind a keverési idő, mind pedig a hőmérséklet erősen befolyásolja a hatását. A kísérleteink elsődlegesen arra vonatkoznak, hogy légbuborékképző adalékszer nélkül hogyan lehet fagyálló elemeket készíteni az előregyártásban, elsősorban hidraulikus kiegészítő anyagok alkalmazásával. Jelenleg alkalmazásban lévő gyári receptúrák optimalizálását végezzük, melyek ipari körülmények között is jól használhatóak lehetnek. A hídszerkezeteknél a cement fajtája és minimális mennyisége is elő van írva, így ezeket is figyelembe vettük. Kétféle vizsgálati módszert alkalmaztunk párhuzamosan, a bemerítéses fagyasztás és a peremes hámlasztás vizsgálatot.

1. BEVEZETÉS

A beton minden esetben tartalmaz vizet, különböző formában. A szabad víztartalom általában 2-4 m%, de ez adott körülmények között elérheti az 5-10 m%-ot, a beton szilárdsági osztályától függően.

A betonban lévő víz fagypont alatti hőmérséklet esetén meg fog fagyni. A beton kötése és száradása során kapilláris pórusok jönnek létre, ami fagyra veszélyessé teszi a betont. Minél tömörebb a beton, annál kevesebb benne a pórus és a nyomószilárdsággal együtt nő a fagyállóság is, de nem teljesen egyezik meg a két folyamat. A másik lehetőség a kapilláris pórusok mesterséges lépgórusokkal való megszakítása.

Setzer (1987) termodinamikai modelljében a vízdiffúzió hatást mikrojéglencse pumpálásnak nevezi. Minden lehűlés alkalmával az összehúzódó gélpórusokból a megnövekedett nyomás hatására víz „pumpálódik" a kapilláris pórusokba, és az ott lévő jéglencsét növelve megfagy. Minden felmelegedés során a gélpórusrendszer tágul, visszaáll az eredetihez közeli nyomásállapot, a gélpórusokban a nyomás csökken, aminek hatására azok vizet vesznek fel azokból a kapillárisokból, amelyekben még van meg nem fagyott víz. Így alakul ki az ismerős, erős „fagy-pumpálás" mindaddig, amíg a kapilláris pórusokban a kritikus víztelítettség létre nem jön. (A jelenség szemléltetése az ***1. ábrán*** látható.) Ez magyarázza a kapilláris pórusok szerepét a fagyás-olvadás folyamatában, és indokolja a kapilláris pórusok mennyiség korlátozásának szükségességét a beton fagyállósága érdekében.



1. ábra: *A fagypumpálás jelensége (Nehme, Betontechnológia előadás, 2013)*

A betonba bekevert légbuborékok nem tudnak vízzel feltöltődni a víz felületi feszültsége miatt. A megfagyó víz térfogat növekedése azonban a beton pórusaiban nyomást hoz létre és ennek hatására a légbuborékok telítődnek, melynek következményeként a nyomás lecsökken és a károkozás is megszűnik.

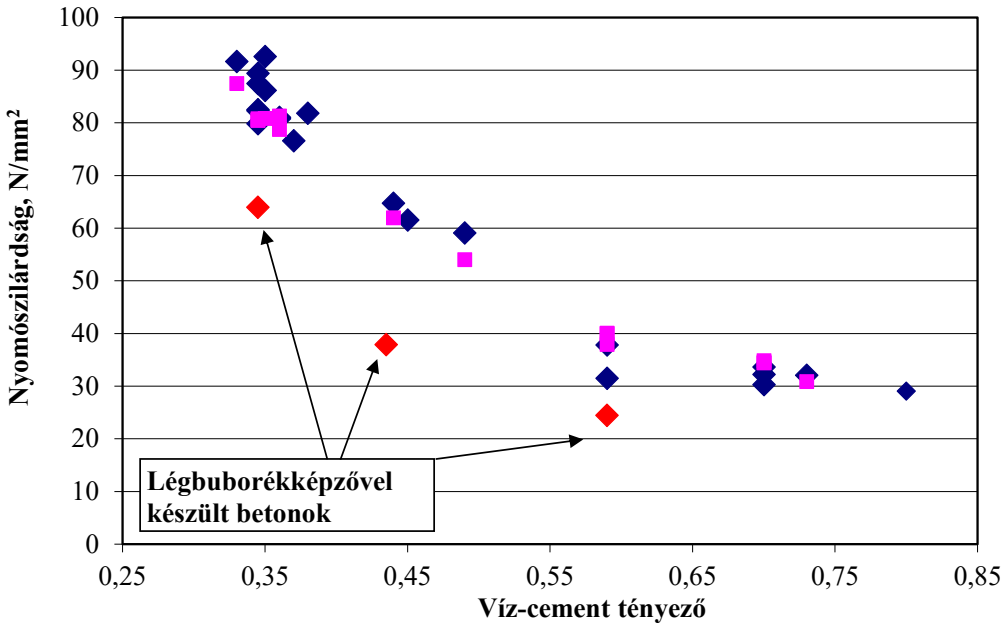
A betonban kialakított légbuborékokkal ezért olyan természetes védelmet alakíthatunk ki, mely egyaránt képes a betont az időjárási fagyok hatásaitól, vagy a sózás általi gyorsfagyasztási hatásokra kialakuló fagyok károkozásától megvédeni.

A beton fagyási tönkremenetelének hátterében a víz jéggé válása során tapasztalt 9-10 V%-os térfogatnövekedés áll. A beton víztartalma függ a környezettől. A betonban található kapillárisok mérete, a víz felületi feszültsége, valamint a környezetből származó nyomás kihat a víz fagyási hőmérsékletére is. A gélpórusokban nem a megszokott 0 °C-os fagyponton fagy a víz, hanem akár -160 °C-on. A fagyáspontokat az ***1. táblázat****ban* lehet megtekinteni, ahol Setzer a gélpórusokat mikropórusoknak tekintette (Setzer, 1987).

1. táblázat: *A betonban lévő pórusok osztályozási rendszere és a víz fagyáspontja (Setzer, 1987).*

Megnevezés	**Átmérő**	**Víz fagyás pontja**	**Vízzáróság**
Mikropórusok (gél)	$\leq 10^{-6}$ mm	-160 °C	Vízzáró
Mezopórusok	10^{-4} mm - 10^{-6} mm	3-10 nm - -43 °C	
		10-100 nm - -15 °C	
Mikro-kapillárisok	10^{-3} mm - 10^{-4} mm	0°C - -3°C	
Kapillárisok	0,3 mm - 10^{-3} mm		Gyengén vízzáró
Makro-kapillárisok	1 mm – 0,3 mm		Vízáteresztő
Durva pórusok	< 1 mm		

A mikrolégpórusok bevitelekor számolni kell a beton nyomószilárdság-csökkenésével. Az erre érvényes összefüggés: 1 V% légpórus tartalom 3-5 N/mm^2 nyomószilárdság-csökkenést okoz (***2. ábra***). Ez a hatás betontechnológiai intézkedésekkel - így például jobb minőségű cementek alkalmazásával és a víz-cement tényező csökkentésével kompenzálható.



2. ábra: *A légbuborékok hatása a beton nyomószilárdságára*

2. KUTATÁSI KONCEPCIÓ

A kutatásunk első lépésében két légbuborékképzővel és mészkőliszt kiegészítőanyaggal gyártott elem fejlesztésére készítettünk különböző módosított összetételeket. A két elem eredeti összetétele hasonló. A közúti terelőelem/reblock elem betonjele C40/50-XC4-XF2-16-F5, a vízelvezető elem/előfej C35/45-XC4-XF2-16-F5. (***3.ábra***) A fő különbség a két termék összetétele között, hogy az előfej szálerősített (Concrix makroszállal 3 kg/m^3 adagolással), míg a reblock elem szálerősítés nélküli. Mindkét elem esetén a légbuborékképző-szer elhagyása a cél. Ez műszaki és gazdasági okból is indokolt. Az alapfeltevés, hogy részben vagy egészben helyettesíteni kell a finomrészként adagolt mészkőlisztet hidraulikus kiegészítőanyaggal.



3. ábra: *A kutatás során fejlesztett elemek balról: Előfej/vízelevezető elem; hídgerenda; közúti terelőelem/reblock*

A vizsgálatba bevont hidraulikus pótlékok a metakaolin és a kohósalak. A kohósalakos vizsgálatok használható eredményt adtak, de sajnos Magyarországon nem lehet megfelelő mennyiségben beszerezni, ezért ennek helyettesítését kohósalakcementtel (CEM III/A 32,5 N, CRH) oldottuk meg. Ezt a cementet kiegészítőanyagként használtuk, mellette a cementre vonatkozó szabályok szerint megtartottuk a tiszta portlandcementet, a minimálisan előírt mennyiségben. Az MSZ 4798-1 nem ír elő 360 kg/m^3-nél nagyobb minimális adagolást egyik környezeti osztály esetén sem, ezért ezt vettük alapul a kísérleti terv összeállítása során.

Készítettünk optimalizálást egy hídgerenda receptúrára is (***3.ábra***). A hídgerenda esetén nem megengedett a légbuborékképző szerek használata, így itt nem ennek az elhagyása, hanem a fagyállóság növelése a cél. Ebben az esetben a szilárdsági követelmény is magasabb, C50/60-XC4-XF2(H)-16-F5. A hídgerenda receptúra optimalizálásánál a kiegészítő anyagok közé választottuk a szilikaport is.

A kutatás ezen szakaszában a cement (CEM I 52,5 R, CRH) és a kiegészítőanyag együttes mennyisége álladó volt és az adalékanyag-váz is azonos volt típusonként. Viszont változtattuk a kiegészítőanyag fajtáját, mennyiségét, és elhagytuk a korábbi kísérletekben alkalmazott légpórusképzőt.

Vizsgáltuk a nyomószilárdságot, a vízzáróságot és a fagyállóságot peremes hámlasztásos és bemerítéses módszerrel is, hogy minden szabványos vizsgálati módszer esetén követhessük a hatást. (A szabványos vizsgálatok közül a távolsági tényezőt nem vizsgáltuk, mivel ezt csak légbuborékképzővel készült betonok esetén lehet értelmezni és a legtöbb vizsgált esetben a légpórusképző adalékszer elhagyása volt a fő cél.)

A nyomószilárdság minden összetétel esetén megfelelő volt, a szükséges szilárdsági osztályt elérte, több esetben meg is haladta azt. Az MSZ 4798-1 szerinti legmagasabb XV3(H) vízzáróságú osztályt is mindegyik összetétel teljesítette. Ezért az összetételek összehasonlításánál a fagyállóság vizsgálat eredményeit tekintettük mérvadónak.

A peremes hámlás vizsgálat a legtöbb összetételnél megfelelt a terméknél elvárt kitéti/környezeti osztálynak, de a bemerítéses vizsgálat eredménye sokszor nem felel meg (tehát ez a kritikus a döntések szempontjából), viszont sok új kísérleti összetétel esetén javítani tudtuk a bemerítéses fagyasztással szembeni ellenállást.

3. EREDMÉNYEK

3.1 Előfej fejlesztése

Az előfej vagy más néven indítóelem esetén az elsődleges cél a légpórusképző adalékszer elhagyása volt. A gyári receptúra szerinti keveréket elkészítettük a saját laborunkban (R1) és a fejlesztett összetételekkel azonos módon vizsgáltuk. Az elvárt betonjel: C535/45-XC4-XF2-16-F5. Az eredeti összetételben a finomrésztartalom biztosítása mészkőliszt adagolással lett megoldva. A fejlesztési koncepcióinkban ezt a mészkőliszt tartalmat, illetve ennek 50%-át terveztük lecserélni kohósalakra, amitől a fagyállóság javulását is várjuk, de a projekt keretében fejlesztett más anyagjellemzők (mint a tűzállóság és a savállóság) esetében is javulást vártunk, elsősorban a szakirodalomban megtalálható németországi tapasztalatok alapján. Sajnos elég hamar realizálódott, hogy Magyarországon nem szerezhető be kohósalak a szükséges mennyiségben és a beszerezhető salakok ráadásul ipari melléktermékek, azaz a minőségük jelentősen eltér a szakirodalmi kísérletekben alkalmazottakhoz képest, ezért úgy döntöttünk,

hogy a hozzáférhetetlen kohósalak helyett CEM III/A jelű, nagy kohósalak tartalmú cementtel helyettesítjük a mészkőlisztet.

Az eredeti összetétel CEM I 52,5 R cementtel készült, mivel az előregyártásban a gazdaságosság és a szilárdsági követelmény teljesítése mellett nagyon fontos a korai szilárdság, és az ezzel elérhető gyors zsaluforgatási lehetőség. Ezen nem változtattunk a kísérleteink során. Az eredeti összetétel szálerősítést (3 kg/m^3 Concrix makroszálat) is tartalmazott, melyet szintén megtartottunk.

Az adalékanyag vázat (44% OH 0-4, 18% OK 4-8, 38% OK 8-16) és a 430 kg/m^3-es cementtartalmat (amin itt a CEM I 52,5 R tiszta portlandcementet kell érteni) és a 0,43-as víz-cement tényezőt állandó paramétereknek tekintettük és az előfejes kísérletsorozat során megtartottuk.

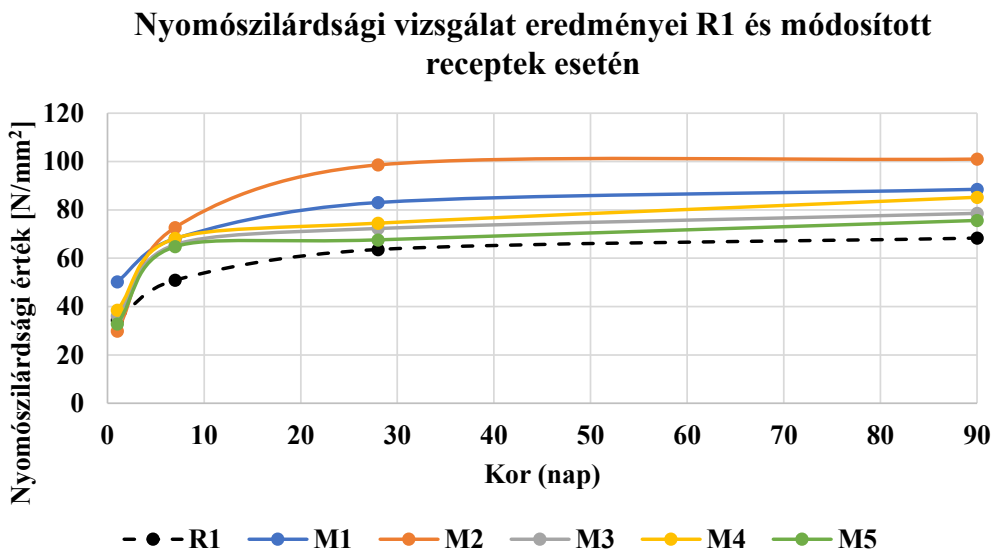
Vizsgáltuk a 28 és 90 napos nyomószilárdságot is. 90 napos korban kisebb mint 10% volt a növekedés, ezért elegendőnek ítéltük a szabványos, 28 napos eredményt vizsgálni a továbbiakban. A peremes hámlás vizsgálatoknál nincs számottevő különbség 28 és 90 napos korban kezdett vizsgálatok között, így a továbbiakban a 90 napos korban kezdett vizsgálatokkal foglalkozunk, mert ez reálisabb a valós esetben (mire kikerül az elem, és eléri az első fagyhatás.)

Első lépésként az eredeti összetételben lévő 0,57% légpórusképzőt hagytuk el (M1), ami jelentős, 20 MPa szilárdságnövekedést eredményezett, mely a vártnál kicsit magasabb érték. Ennek az összetételnek csökkent a fagyállósága, de még így is megfelelt, viszont célunk volt ezt is tovább javítani.

A következő lépésben az így kapott összetételben az I. típusú, azaz inert mészkőliszt felét (30 kg/m^3-t) II. típusú, azaz látens hidraulikus kiegészítőanyaggal helyettesítettük, először metakaolinnal (M2). Ezzel további 18% nyomószilárdság növekedést értünk el, a legnagyobb értéket az előfejre vonatkozó kísérleti összetételek esetén. A peremes lehámlás mennyisége a helyettesítés előtti állapot tizedére csökkent.

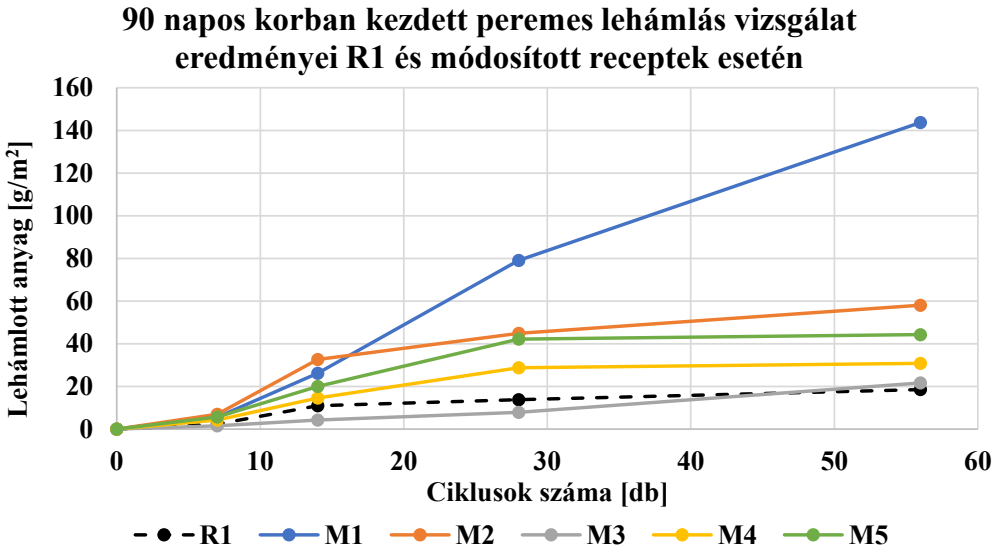
A harmadik lépésben, az eredetileg tervezett kohósalak alkalmazása helyett a fent említett okok miatt CEM III-as cementtel (M3) helyettesítettük a teljes mészkőliszt-tartalmat (60 kg/m^3-t). Az így kapott nyomószilárdság magasabb volt, mint a kiindulási összetételben, de nem érte el a metakaolinos összetétel szilárdságát.

Ezt követően 30 kg-onként tovább növeltük a CEM III tartalmat, de ezt már a CEM I mennyiségének azonos mértékű csökkentése mellett. A CEM I/CEM III arányát addig változtattuk, hogy a tiszta portland cement a szabványban előírt minimálisan előírt mennyiség felett maradjon még (M4, M5). A két cementfajta együttes alkalmazása esetén a legjobb eredményt a 400 kg/m^3 CEM I + 90 kg/m^3 CEM III alkalmazása adta (M4), de ez sem érte el, csak jól közelítette a metakaolinos változat nyomószilárdságát. Ha már 120 kg CEM III-at adagoltunk a teljes kötőanyagtartalmat állandó értéken tartva, akkor nagyobb csökkenés volt tapasztalható (M5), ám még mindig az eredeti érték feletti nyomószilárdságot mértünk (***4.ábra***).



4. ábra: *Nyomószilárdsági eredmények az R1 jelű előfej és módosított receptúrái esetén*

Sem a metakaolin, sem pedig a CEM III kiegészítő anyagként való alkalmazása nem változtatta jelentősen a fagyhámlással szembeni ellenállóképességet, mivel a lehámlott mennyiség ugyan a háromszorosára nőtt az etalon keverékéhez képest, de a legszigorúbb megfelelési osztály (XF4) határértékeit egyik sem közelítette meg. A légpórusképző adalékszer elhagyása (M1) közel hétszeres romlást eredményezett, de még ez a keverék is megfelelt az XF4-es osztály követelményeinek (***5. ábra***).

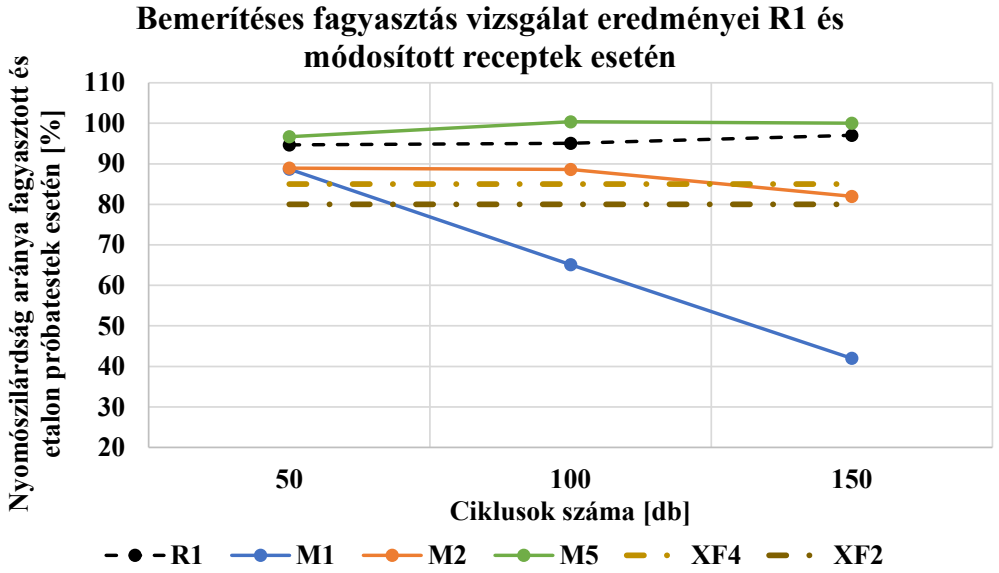


5. ábra: *90 napos korban kezdett peremes lehámlás vizsgálat eredményei az R1 jelű előfej és módosított receptúrái esetén*

A bemerítéses fagyasztás vizsgálatot csak a légpórusképző elhagyásával (M1) készült, továbbá a legmagasabb nyomószilárdságú (metakaolinos, M2) és a legkisebb nyomószilárdságú (legmagasabb CEM III tartalmú, M5) összetételre végeztük el a vizsgálat nagy hely, gép és időigénye miatt.

A légpórusképző adalékszer elhagyása abszolút tönkremenetelt okoz, 50 ciklusnál még megfelel XF4-nek, de 100 és 150 ciklusnál (ami a Magyarországon elvárt ciklusszám a földrajzi környezeti viszonyok miatt) már abszolút nem (50% alá csökkent a szilárdság). Ezáltal megállapítható, hogy nem hagyható el a légpórusképző adalékszer a mészkőliszt alkalmazásának megtartása mellett, hiába felelt meg a többi követelménynek.

A metakaolint tartalmazó összetétel (M2) már elérte az eredeti követelménynek megfelelő XF2 határt (20%-nál nem nagyobb szilárdságcsökkenés), de a legjobb eredményt a CEM III tartalmú (M5) összetételnél tapasztaltuk, ez még a referencia összetétel értékénél is jobb lett (***6.ábra***).



6. ábra: *Bemerítéses fagyasztás eredmények az R1 jelű előfej és módosított receptúrái esetén*

A vízzáróságot is megvizsgáltuk, és minden esetben megfelelt a legszigorúbb XV3(H) osztálynak, érdemi változást nem okozott egyik változtatás sem.

3.2 Reblock elem fejlesztése:

Ebben az esetben referenciaként (R2) a gyári mintát használtuk, melynek jele C40/50-XC4-XF2-16-F5.

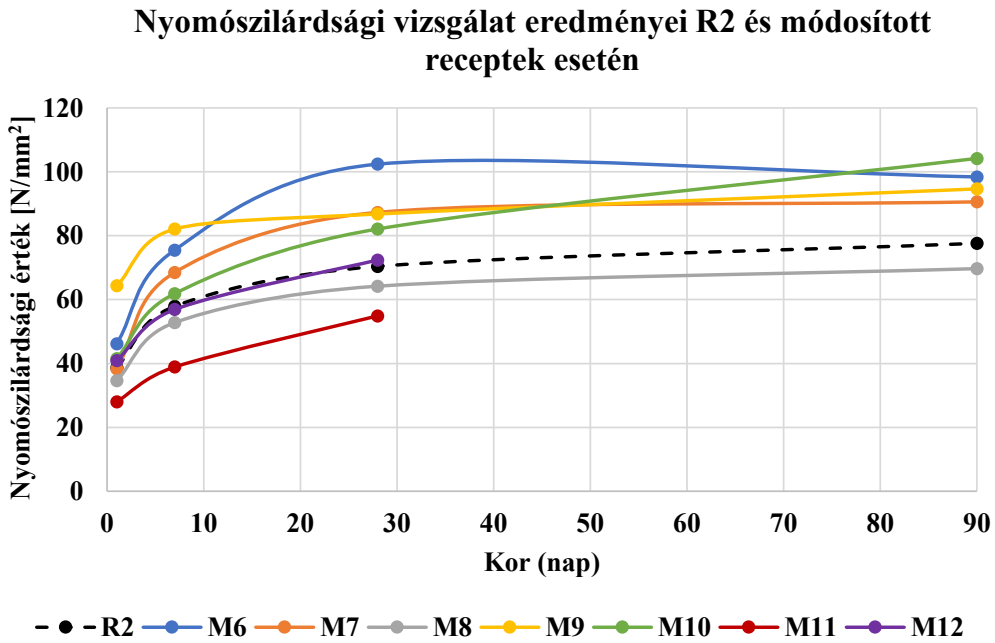
Az adalékanyag vázon nem változtattunk (45,9% OH 0-4, 23,4% OK 4-8, 30,7% OK 8-16), a cement fajtáját (CEM I 52,5 R) és a víz-cement (0,42) tényezőt is állandónak tekintettük a kísérletben. Az eredeti (R2) összetételben 420 kg/m^3 cementtartalom és 100 kg/m^3 mészkőliszt tartalom volt.

Az összetétel-tervezés során a cement és a kiegészítőanyag összegét 520 kg/m^3-es álladó értéken tartottuk. Az elsődleges cél az eredeti összetételben lévő (0,59%) légpórusképző adalékszer elhagyása volt. A fő különbség még az összetételben az előfejhez képest az volt, hogy ezen elemek eredetileg (sem pedig a módosított összetételek esetén) nem tartalmaztak szálerősítést.

Első lépésben kipróbáltunk egy részleges metakaolin helyettesítést (70 kg/m^3 mészkőliszt + 30 kg/m^3 metakaolin adagolást, M6). Továbbá a mészkőlisztet 100%-ban (100 kg/m^3) kohósalakkal (M7), majd CEM III cementtel helyettesítettük (M8).
A CEM III adagolás esetében itt is vizsgáltuk az össz-cementmennyiséget különböző arányban, 390 + 130 kg/m^3 és 360 + 160 kg/m^3 adagolással (M9 és M10).

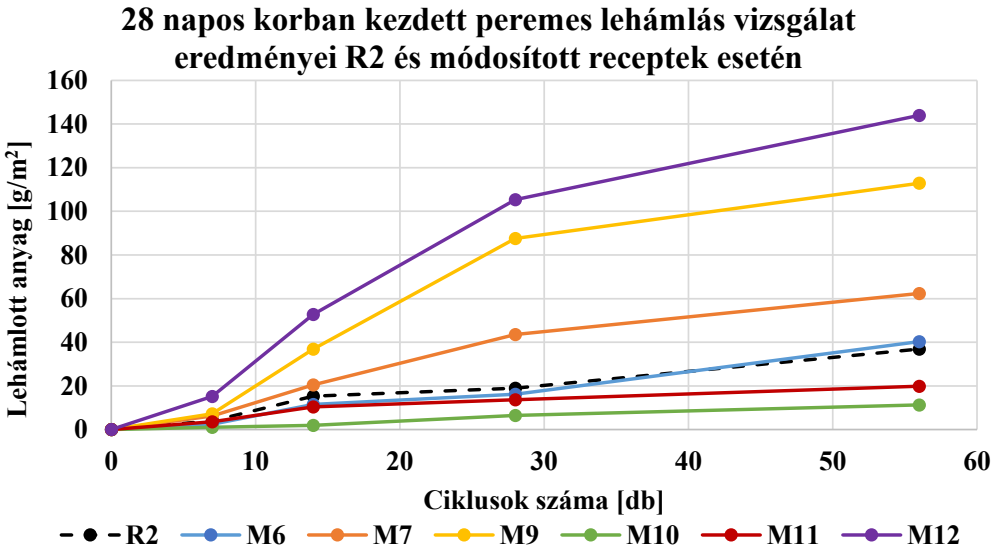
A CEM III-mal való helyettesítésnél még egy kiegészítő vizsgálatot is végeztünk, az M8-as és M9-es keveréket elkészítettük légpórusképző adalékszerrel is (de itt kisebb, 0,25%-os mennyiséggel az eredetihez képest), mert az ilyen kevert cementek esetén a cementcsere hatását is szerettük volna önmagában értékelni (M11, M12), még ha ez nem is volt eredetileg meghatározott cél a kísérleti optimalizálás során, de az anyagviselkedés megismerésében hasznosnak tartottuk.

A reblock elem nyomószilárdságát az előfejnél szerzett tapasztalok alapján csak a szabványos 28 napos korban hasonlítottuk össze. A legjobb ennél az elemnél is a részleges metakaolinra való cserélés volt (M6), de a mészkőliszt kohósalakra cserélése is növelte a szilárdságot (M7). A CEM III alkalmazása is megfelelő volt, mert az adagolás függvényében megközelítette, vagy kicsit meg is haladta a kiindulási szilárdságot (***7. ábra***).

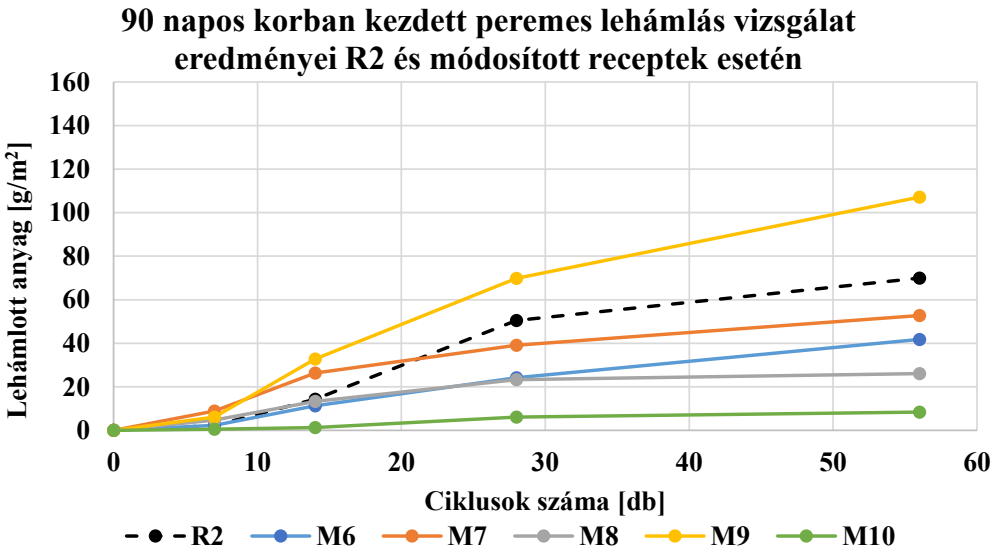


7. ábra: *Nyomószilárdsági eredmények az R2 jelű reblock elem és módosított receptúrái esetén*

A fagyhámlás eredmények kedvezők voltak, bőven a határérték alatt maradtak minden esetben (***8. és 9. ábra***). A metakaolinnal való helyettesítés (M6) körülbelül a légpórusképző adalékszer hatásával egyenértékű fagyhámlás szempontjából. A kohósalak (M7) és a CEM III helyettesítés esetén (M8) valamennyivel magasabb lehámlott mennyiséget kaptunk, mint a referencia esetén, de ez is bőven megfelelt a követelményeknek. A kohósalaknál érdekesség, hogy a 28 naposan kezdett vizsgálatnak lényegesen rosszabb lett az eredménye, mint a 90 napos korban kezdetté, de még ez is megfelelt az elvárt környezeti/kitéti osztály követelményeinek.



8. ábra: *28 napos korban kezdett peremes lehámlás vizsgálat eredményei az R2 jelű reblock és módosított receptúrái esetén*



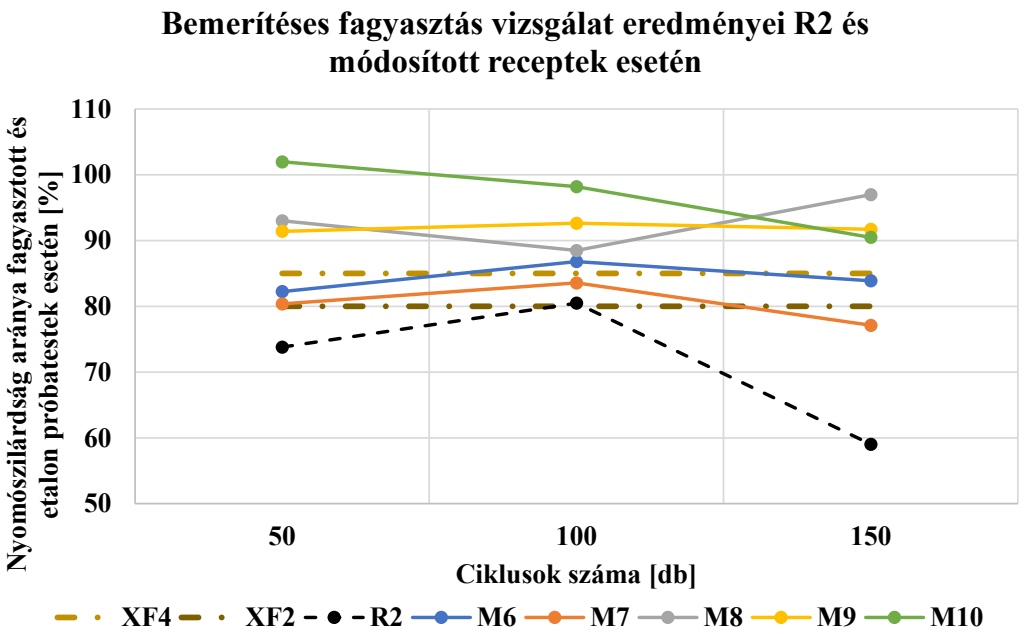
9. ábra: *90 napos korban kezdett peremes lehámlás vizsgálat eredményei az R2 jelű reblock és módosított receptúrái esetén*

A bemerítéses fagyasztás vizsgálat az eredeti összetétel (R2) esetén nem felelt meg 150 ciklusnál (59%). A CEM III-mal való legnagyobb mértékű helyettesítés esetén (M8), valamint a másik két adagolásnál is megfelelt XF4-nek (***10. ábra***).

A kohósalakos kiegészítő anyag alkalmazása esetén 100 ciklus után nagyobb értékek adódtak a mérés során, mint 50 ciklusnál, ezért úgy véljük, hogy a későbbiekben egy célzott kutatás során érdemes lesz ezzel foglalkozni.

Metakaolin alkalmazása (M6) esetén XF2 osztályt elérhetünk (elvárt szilárdság). A kohósalak alkalmazásakor ugyan jelentősen javult a fagyállóság az eredetihez képest, de már éppen nem felelt meg az XF2 követelménynek, ám mivel a kohósalakos cement jól működött, ezért kisebb mennyiségű, vagy jobb minőségű kohósalak alkalmazásával már feltételezhető, hogy készíthető lenne megfelelő összetétel.

Az M8 és M9 légpórusképző adalékszeres változatából (M11, M12) a bemerítéses fagyasztás esetén csak 50 ciklusig végeztünk vizsgálatot a drasztikus szilárdság csökkenés miatt, és ezt követően elvetettük ezt a koncepciót. A peremes lehámlás vizsgálat esetén sem javultak érdemben az eredmények. Ebből azt a következtetést tudjuk levonni, hogy az etalon rossz értékeit valószínűleg a mészkőliszt okozza, nem az légpórusképző adalékszer.



10. ábra: *90 napos korban kezdett peremes lehámlás vizsgálat eredményei az R2 jelű reblock és módosított receptúrái esetén*

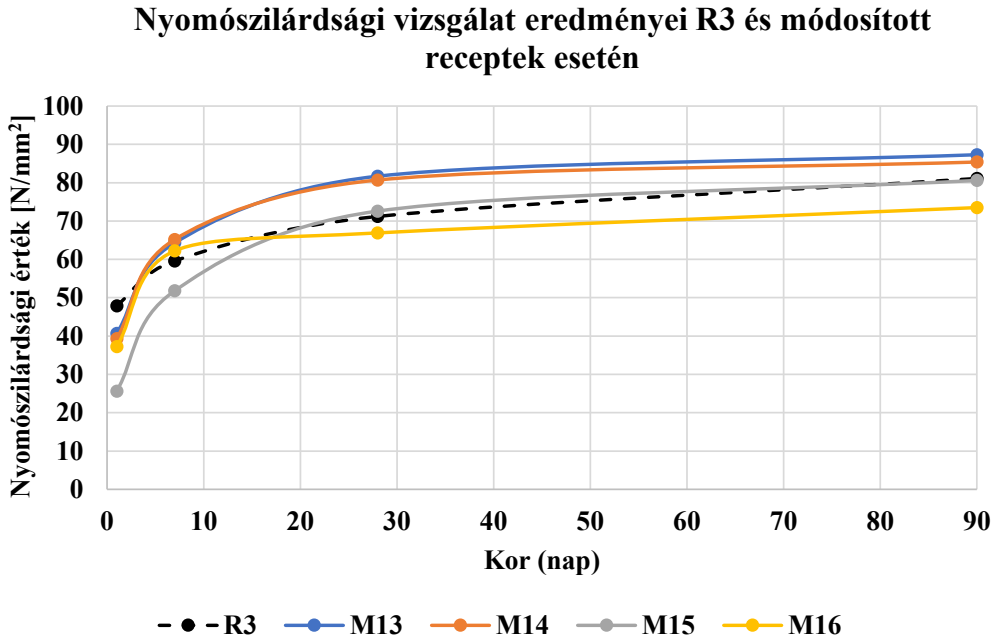
Ennél az elemtípusnál is ellenőriztük a vízzárósági követelmények teljesülését és itt is minden összetétel megfelelt a legszigorúbb XV3 osztálynak, érdemi változást nem okozott egyik változtatás sem.

3.3 Hídgerenda fejlesztése:

A hídgerenda elem fejlesztése során az eddigi elemekhez képesti fő különbség az volt, hogy a hídgerenda esetén a kiindulási gyári összetétel sem tartalmaz légpórusképző adalékszert, mert ennek alkalmazása a hídszerkezetek esetében tilos Magyarországon, enélkül kell a fagyállósági követelményeknek megfelelni. Erre utal a beton jelében az XF2 környezeti osztály után a (H) jelölés. Ebben a kísérletsorozatban tehát csak a kiegészítőanyagok hatását vizsgáltuk.

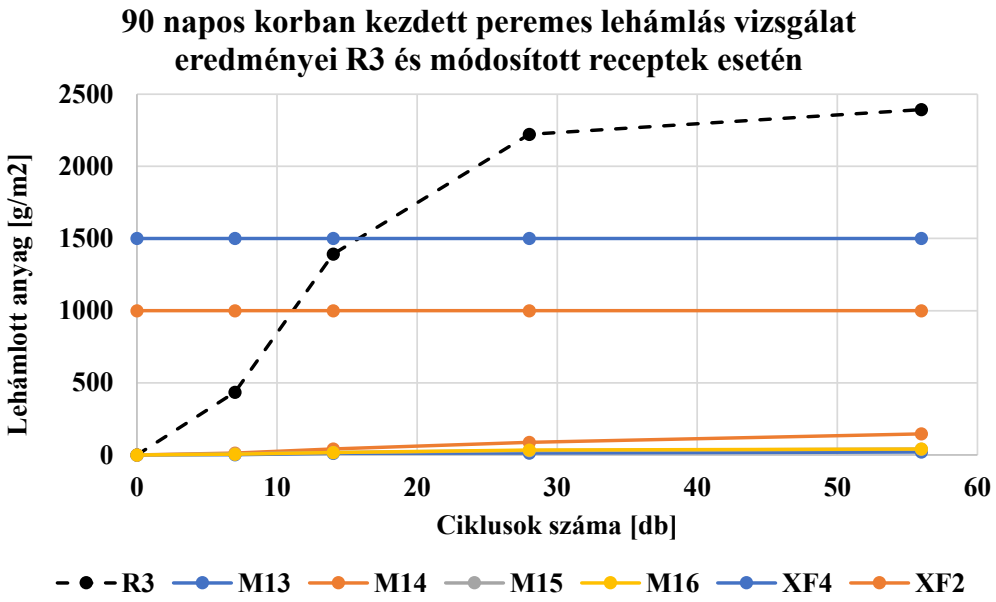
Az eredeti szilárdsági követelmény is nagyobb, az elvárt betonjel C50/60-XC4-XF2(H)-16-F5. Ez már a gyári recetúrában is nagyobb 450 kg/m^3 cementtartalmat (CEM I 52,5 R) és kisebb 30 kg/m^3 mészkőliszt tartalmat jelent. Ennél az elemnél is gyári mintát használtunk etalonként (R3). Az adalékanyag vázon ebben az esetben sem változtattunk a kísérletsorozat során (37,5% OH 0-4, 28,7% OK 4-8, 33,8% OK 8-16) és a víz-cement (víz-kötőanyag) tényező értéke is konstans (0,41) volt.

Bár az etalon szilárdsága magas volt, nem felelt meg semelyik fagyállósági követelmények sem, ezért itt jelentős változtatást tartottunk szükségesnek. Ezért az első lépésben (M13) a teljes mészkőliszt tartalmat lecseréltük 15+15 kg/m^3 metakaolin + szilikaporra, majd 30 kg/m^3 kohósalakra (M14), valamint CEM III-ra (M15). A metakaolin + szilikapor, illetve a kohósalakra való csere 14%-kal növelte meg a nyomószilárdságot, míg a CEM III alkalmazása mellett a szilárdság érdemben nem változott. A második lépésben 90 kg-ra növeltük a CEM III mennyiségét az összes cementtartalom megtartása mellett (M16), ebben az esetben 6%-kal csökkent szilárdság, de az előírt szilárdsági osztály követelményeit még így is teljesítette (***11. ábra***).



11. ábra: *Nyomószilárdsági eredmények az R3 jelű hídgerenda és módosított receptúrái esetén*

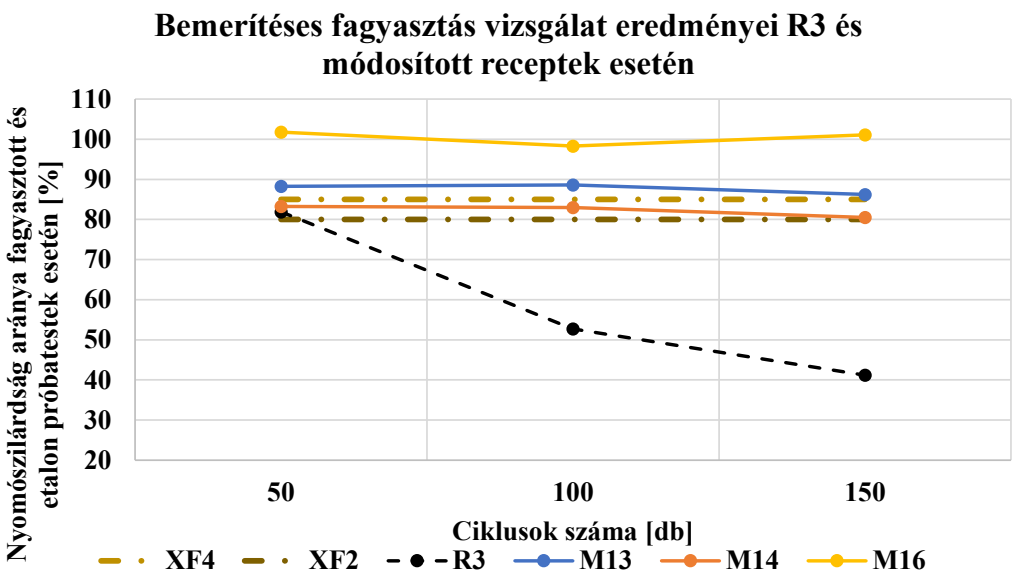
Peremes lehámlás vizsgálatra az eredeti összetétel meglehetősen nem felelt meg, 2200g/m^2 lett a lehámlás értéke a megengedett 1000g/m^2 helyett. Mind 28 mind 90 napos korban kezdve a vizsgálatot rossz eredmény adódott. Ehhez képest rendkívül jó eredmény, hogy mindegyik helyettesítéssel az XF4 követelményeinek megfelelő eredményt értünk el. A metakaolin és szilikapor együttes adagolása, valamint a CEM III jelű cement helyettesítéssel nagyon jó eredményt értünk el, de a kohósalak alkalmazása esetén is csak a határérték 15%-a volt a lehámlott mennyiség. Ebben az esetben általánosan levonhatjuk azt a következtetést, hogy az I-es típusú (inert) kiegészítőanyag II-es típusú (látens hidraulikusra) vagy cementre való cseréje a peremes fagyhámlás szempontjából nagyon hatékony (***12. ábra***).



12. ábra: *Peremes lehámlás vizsgálat eredményei az R3 jelű hídgerenda és módosított receptúrái esetén*

Bemerítéses fagyasztásra az eredeti receptúra csak 50 ciklusig felelt meg, 100 és 150 ciklust követően a szilárdság drasztikusan lecsökkent (53 és 41%-ra). A kísérleti összetételek esetén a CEM III-as helyettesítés bizonyult a legjobbnak (100%), de csak ha 90 napos korban kezdtük a vizsgálatot.

A metakaolin + szilikapor kiegészítőanyagú összetétel is megfelelt az XF4 követelménynek, a kohósalakos csak az XF2-nek, de még ez is jóval kedvezőbb, mint a kiindulási összetétel.



13. ábra: *Bemerítéses fagyasztás vizsgálat eredményei az R3 jelű hídgerenda és módosított receptúrái esetén*

A vízzáróság vizsgálat a legszigorúbb követelményeknek való megfelelést igazolta a hídgerenda elem eredeti és összes kísérleti összetétele esetén. Az etalonok közül ez volt a leggyengébb vízzáróságú elem, és a kiegészítő anyagok itt láthatóan csökkentették a vízbehatolás mértékét.

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK

Három infrastruktúra elem összetételét és azok fejlesztését vizsgáltuk. A fejlesztés célja elsősorban a fagyállóság volt, amit mind a peremes hámlasztásos, mind pedig a bemerítéses vizsgálattal ellenőriztünk. Elsődleges cél volt az alkalmazott légpórusképző adalékszerek elhagyása, illetve a hídgerenda elemnél, ahol tilos ennek használata, az elvárt fagyállósági követelmények teljesítése.

Az összetételben a légpórusképző adalékszer elhagyása mellett a másik koncepcionális változtatás a kiegészítőanyag lecserélése, illetve az összes-kötőanyagtartalom megtartása mellett a mennyiségének változtatása volt. A kísérletink során vizsgáltuk az nyomószilárdságot is, melyek minden esetben a szakirodalmai adatoknak megfelelően alakultak.

Minden elem esetén sikerült az elvárásoknak megfelelő új receptúrákat kikísérletezni. Az eredményekről általánosságban levonható következtések az alábbiak.

- Szilárdságra minden esetben szakirodalmilag elvárhatóan volt hatása a különböző kiegészítő anyagok alkalmazásának.
- Legjobb eredményt a fagyasztási vizsgálatok eredményei alapján metakaolin, vagy CEM III, mint kiegészítő anyag alkalmazása hozta.
- Gazdasági kérdés, hogy a plusz siló felállítása az új kiegészítőanyag alkalmazása miatt megvalósítható-e, valamint, hogy melyik kiegészítőanyag alkalmazása egyszerűbb.

- A vízzáróságot érdemben nem befolyásolta ezeknél a recepteknél se szálak jelenléte, se a légpórusképző adalékszer, se a kiegészítő anyag fajtája, mennyisége.
- A két különböző fagyállóság vizsgálat eredményei között lényeges eltérés figyelhető meg, a peremes lehámlás vizsgálatnál elsődleges a tömörség kérdése, a légpórusképző hatása kis mértékű, megfelelően tömör anyag esetén elhagyható, hidraulikus kiegészítőanyag alkalmazása esetén elért tömörség esetén kellően megközelíthetjük/meghaladhatjuk a légpórusképző hatását, míg bemerítéses fagyasztásnál számít a légpórusképző adalékszer jelenléte.
- Minden fagyasztásnál megfigyelhető, hogy a hidraulikus kötőanyag megfelelő működéséhez idő kell, mivel jobb eredményt kapunk a vizsgálatok 90 napos korban történő kezdésekor. Ez nem probléma az előregyártott szerkezeteknél, hiszen reálisan 90 nap után éri majd őket a fagyhatás.
- A fagyállóság szerepe fontosabb, mint a nyomószilárdságé, ezért elsősorban ezeket az eredménykét kell figyelembe venni.

5. IRODALOM

Ansari, Zhang, Maher, Szary, (2002): Effects of Synthetic Air Entraining Agents on Compressive Strength of Portland Cement Concrete Mechanism of Interaction and Remediation Strategy, Final report July.

Balázs Gy. – Erdélyi A. – Kovács, K. (1990): „Fagy és olvasztósók hatása a beton tartósságára”, *Építőanyag* XLII. évf. 1990. 2. szám.

Balázs Gy. – Tóth E. (1997): „Beton- és vasbeton szerkezetek diagnosztikája, I. általános diagnosztikai vizsgálatok”, *Műegyetemi Kiadó* 1997.

Balázs Gy. – Tóth E. (1998): „Beton- és vasbeton szerkezetek diagnosztikája, II. általános diagnosztikai vizsgálatok”, *Műegyetemi Kiadó* 1998.Beddoe, R.E., Setzer, M.J. (1988): „A low-temperature DSC investigation of hardened cement paste subjected to chloride action”, Cement and Concrete Research, Vol. 18, pp. 249-256.

Borosnyói, A. (2011), Építőanyagok MSc, 2. előadás

Cordon és Merrill (1963): Requirements for freezing and thawing durability for concrete. Proc. ASTM 63, 1026-1035

Mindess, S., Young, J. F. (1981): Concrete. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

MSZ 4798:2016 – Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelőség, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon, Magyar Szabványügyi Testület

MSZ 4798-1:2004 – Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőképesség, Magyar Szabványügyi Testület – visszavont

MSZ CEN TS 12390-9:2007 – A megszilárdult beton vizsgálata. 9. rész: Fagyállóság. Lehámlás, Magyar Szabványügyi Testület - visszavont

MSZ EN 12390-2 – A megszilárdult beton vizsgálata. 2. rész: A szilárdságvizsgálatokhoz szükséges próbatestek készítése és tárolása, Magyar Szabványügyi Testület

MSZ EN 12390-3 – A megszilárdult beton vizsgálata. 3. rész: A próbatestek nyomószilárdsága, Magyar Szabványügyi Testület

MSZ EN 12390-8 – A megszilárdult beton vizsgálata. 8. rész: A vízzáróság vizsgálata, Magyar Szabványügyi Testület

Nehme (2004): „A beton porozitása” doktori disszertáció

Nehme S.G. (2013): Betontechnológia előadás, BME, MSc Szerkezetépítő ágazat

Setzer, M. J., (1987): „Einwirkung von Kohlenoxid, Schwefeldioxid und Wasser auf Beton Langzeitverhalten und Instandsetzen von Ingenieurbauwerken aus Beton", Fachtagung 10/11. März 1987 Bayerische Bauindustrieverband a. V. München und Baustoffinstitut der Technischen Universität München, pp. 2-9.

Young, J.F., Hansen, W. (1987): Volume Relationships for C-S-H Formation Based on Hydration Stoichiometries, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 85, pp. 313.

A BETON KÉMIAI ELLENÁLLÓ KÉPESSÉGÉNEK FOKOZÁSA – ÁTTEKINTÉS AZ NVKP_16-1-2016-0019 PROJEKT ALTÉMÁJÁNAK FELADATAIRÓL ÉS EREDMÉNYEIRŐL

Kopecskó Katalin, Horváth Szilvia, Kováts Marcell, Mlinárik Lilla, Must Anita, Somlai Bálint, Zsovár Zsófia, Balázs L. György
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

ÖSSZEFOGLALÁS

Konzorciumi kutatócsoportunk olyan fejlesztési területeken vállalt közös erőfeszítéseket, amelyek a környezetünket jelentősen meghatározó vasbetonszerkezetek biztonságosabb és hosszabb élettartamú használatára nyújtanak lehetőséget, erőforrásaink hatékonyabb kihasználása mellett. Törekvéseink elsődleges célja olyan betonösszetételek kikísérletezése és olyan beton termékek készítése volt, amelyek nagyobb ellenálló képességet biztosítanak a szokványos betonokhoz képest az agresszív kémiai közegekkel (pH <5) szemben. Mindezen elvárások teljesítése elsősorban anyagtani, ill. anyagtudományi megközelítéseket igényeltek. Kutatásunk módszere (i) a vonatkozó fizikai-kémiai-biológiai hatásokra bekövetkező leromlási folyamatok megismerése, (ii) a leromlási folyamatok sebességének csökkentése, valamint (iii) a folyamatok vizsgálatára alkalmas eljárások és vizsgáló eszközök kifejlesztése.

1. BEVEZETÉS – FELADATAINK

A beton többkomponensű anyagi rendszer, amelynek viselkedését (szilárdságát, tartósságát és egyéb tulajdonságait) jelentős részben összetevőinek tulajdonságai határozzák meg. Kutatásunk ezért kiterjedt különböző, elsősorban előregyártásban használatos portlandcementek és cement kiegészítő anyagok (szilikapor, metakaolin, kohósalak, pernye), a belőlük készített habarcsok, majd egyes előregyártott vasbeton termékek betonjainak széleskörű vizsgálataira. Jelen cikkben ezen vizsgálatok eredményeiből mutatunk be válogatást.

A három éves kutatás elsődleges célja előregyártott vasbeton elemek tulajdonságainak javítása és ezáltal élettartamának lehetséges növelése volt. A kutatás során az első mérföldkőben cement kiegészítőanyagokkal készített cementpép és habarcs mintákon, a második mérföldkő során kereskedelmi forgalomban kapható, valamint laboratóriumi cementekkel készített cementpép és habarcs mintákon végeztünk kísérleteket, végezetül a harmadik mérföldkőben öt kiválasztott termék és két prototípus termék betonjának kémiai ellenálló képességét vizsgáltuk meg.

A kémiai ellenállóképességet először cementpép kockákon vizsgáltuk statikus (kézi) módszerrel savas közegekben, abráziós hatással vagy anélkül, majd kifejlesztve a kémiai ellenálló képesség vizsgálatára alkalmas vizsgáló berendezést, dinamikus (gépi) módszerrel habarcs, illetve beton próbatesteken is vizsgáltuk az ellenállóképességet, valamint a tönkremeneteli folyamatokat.

Az ellenálló képességi vizsgálatok eredményeinek alátámasztására, és az ok-okozati összefüggések feltárására a vizsgálati körbe bevont anyagok, valamint vizsgált próbatestek

számos tulajdonságát tanulmányoztuk. A kutatásba bevont anyagokat vizsgáltuk a projekt során beszerzett új vizsgáló eszközökkel, nevezetesen vizsgáltuk a porszerű kötőanyagok (cementek és cement kiegészítőanyagok) Zéta-potenciálját, hidratációs hő fejlődését izoterm kalorimetriával, valamint a szemcsék morfológiáját pásztázó elektron mikroszkóppal. Ezekhez a vizsgálatokhoz a projekt támogatásával lehetőségünk nyílt egy Malvern Zetasizer Nano ZS Zéta-potenciál mérő, egy Tam Air háromcsatornás iker-kaloriméter és egy Phenom-World Phenom XL pásztázó elektron mikroszkóp beszerzésére.

A Malvern Zetasizer Nano ZS Zéta-potenciál mérő beszerzése lehetővé tette, hogy Magyarországon elsőként alkalmazzuk a Zéta-potenciál mérésének lehetőségét építőmérnöki területen, kötőanyag szemcséken. Betontechnológia szempontból nagy jelentőséggel bír a diszpergált részecskék, cementek és a cement kiegészítő anyagok felületi töltöttségét megismerni. Ezen kívül a felületi töltöttség megváltoztatásának lehetősége, a különböző típusú adalékszerek hatása is tanulmányozható a módszerrel.

A megszilárdult minták esetében a legfontosabb vizsgálatok között említhetjük meg a kloridionokkal szembeni ellenálló képesség vizsgálatát, valamint a porozitás és változásának vizsgálatát. A kloridionokkal szembeni ellenálló képesség vizsgálatát gyors elektromos migrációs módszerrel végeztük, a Nordtest NT Build 492 vizsgálati szabvány szerint. A kloridion migrációs vizsgálatokhoz rendelkezésünkre áll két vizsgáló berendezés összesen 6 cellával. A porozitás eloszlás vizsgálatokat a kutatás során a SZIKKTI Kft. végezte alvállakozóként, higany-intrúziós porozimetriás módszerrel. Ezen kívül a leromlási folyamatok tanulmányozására computer tomograph (CT) vizsgálatokat is végeztettünk (Geosoft Bt. és TOMOGEO Kft.). A savkorróziós vizsgálatokat követően lehetőségünk nyílt a próbatestek és behatolási frontok tanulmányozására kőzettani vékonycsiszolatokon optikai mikroszkópos módszerrel, valamint pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálattal.

A BME vállalásai közé tartozott, hogy létrehozunk kétfajta savkorróziós prototípus berendezést, amelyek alkalmasak a cementkötésű anyagok (habarcs, beton) kémiai ellenálló képességének, azaz savkorróziójának tanulmányozására. Vállalásunkat teljesítettük azáltal, hogy sikeresen kifejlesztettünk két különböző berendezést: forgórendszerű és savsugaras (fúvókás) rendszerű berendezést. A forgórendszerű berendezésből három került legyártásra, hogy párhuzamosan akár három különböző környezet hatását is tudjuk tanulmányozni. A berendezéseket próbaüzem során teszteltük, majd a kutatás célkitűzéseinek megfelelően használtuk habarcs, illetve beton próbatestjeink vizsgálatára. Mindkét berendezés használatához kidolgoztunk egy-egy vizsgálati eljárást, amit a BME szellemitulajdon-kezelés szabályzatának előírásait és folyamatát követve és teljesítve a Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala által önkéntes műnyilvántartásba vetettünk (know-how formájában).

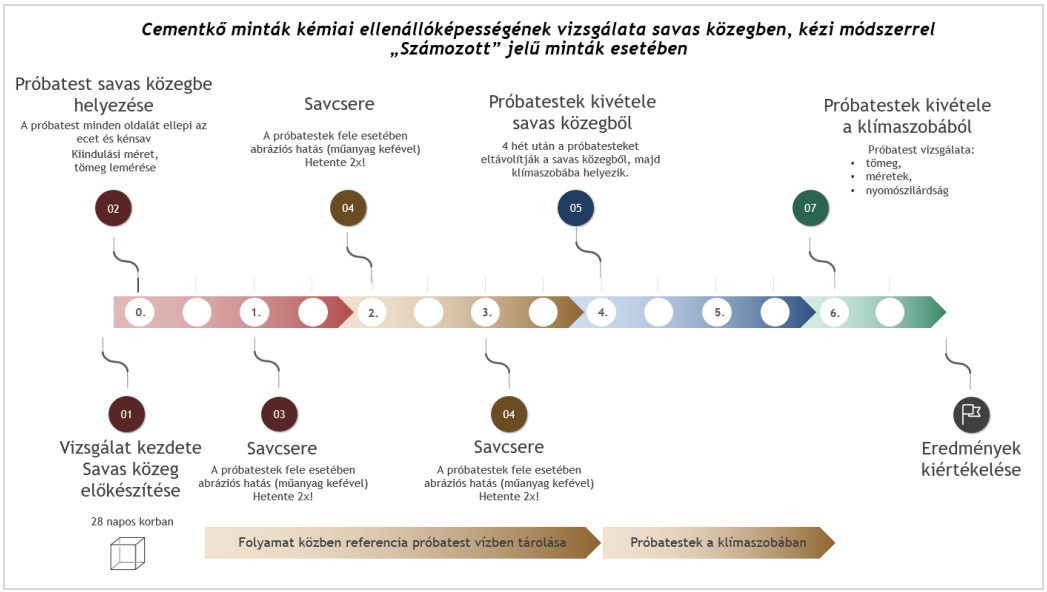
A kémiai ellenálló képességet nem csak cementkötésű anyagokon tanulmányoztuk, hanem kitekintve erről a területről, távolabbi célok értelmében és a fenntarthatóság célkitűzéseit is szem előtt tartva, alkáli aktivált anyagokkal, geopolimerekkel is kísérleteztünk. Eredményeink ezen a területen bíztatóak, a kötőanyag optimalizálásán keresztül eljutottunk a szálerősítéssel javított tulajdonságú geopolimerekig.

A három éves kutatás során rendkívül sok vizsgálati eredménnyel gyarapodtunk, amelyek egy részének értékelése még folyamatban van. Jelen cikkben a kutatás során leghosszabb ideig tanulmányozott mintacsoporton elért legfontosabb és mindenképpen említésre méltó eredményeket soroljuk fel.

3. CEMENTKŐ ÉS HABARCS KÍSÉRLETEK – MÉRFÖLDKŐ-1

3.1 Kísérleti terv, anyagok és módszerek

A kutatási feladatot a projekt első mérföldkövében kezdtük el. Az ezt követő mérföldkövekben az erre épülő kísérleteket végeztük el. A feladat során a különböző cementkiegészítő anyagok hosszútávú hatását vizsgáltuk a beton teljesítőképességére nézve, cementpép, illetve habarcs próbatesteken. A kísérletekhez 30 mm élhosszúságú cementpép kockákat, valamint az egyes vizsgálatoknak megfelelő méretű habarcs próbatesteket gyártottunk. Egyes vizsgálatokat, pl. a kloridion migrációs koefficiens meghatározását, két éves korban is elvégeztünk. A kémiai ellenállóképességet kétféle módon vizsgáltuk: (i) cementpép kockákon statikus (kézi) módszerrel, amelyet 28 napos korban kezdtünk el, majd az ellenőrző vizsgálatokat 90 napos korban végeztük (**1. ábra**); majd (ii) habarcs hasábokon egy éves korban, dinamikus (forgó gépi) módszerrel (**2. ábra**). A forgó rendszerű berendezést az első mérföldkő során fejlesztettük, majd teszteltük kétféle betonon és háromféle savval, ezt követően tudtuk a habarcs hasábok vizsgálatát elkezdeni.



1. ábra: Kísérleti terv a „számozott jelű", különböző kiegészítőanyag tartalmú cementpép minták vizsgálatához
(ábrát készítette: Zsovár Zsófia Ilona szakmérnöki diplomamunka, konzulens: Dr. Kopecskó Katalin)

Ebben a kísérleti szakaszban négy cementkiegészítő anyag különböző adagolásának hatásait vizsgáltuk: a Centrilit NC (MK1) és Metaver N (MK2) típusú metakaolinokat, a Microsit 20 (MS) típusú szűrt kőszénpernyét, valamint a Centrilit Fume SX (SF) szilikapor szuszpenziót. A kétösszetevős keverékeken kívül vizsgáltuk a háromösszetevős keverékek (ternary blend), tehát a kötőanyag kombinációk viselkedését is. A próbatestek a Rohoznik CEM I 42,5 N-SR0 típusú szulfátálló portlandcement felhasználásával készültek. A cementpép próbatesteket azonos, kissé képlékeny konzisztenciára állítottunk be, úgy, hogy folyósító szert nem használtunk. A habarcs próbatesteket w/b=0,4 víz-kötőanyag tényezővel készítettük el, ezeknél a keverékeknél az azonos konzisztenciát folyósító szer adagolásával állítottuk be. Az egyes receptúrákban a felhasznált cement és cementkiegészítő anyagok százalékos eloszlását az **1. táblázatban** mutatjuk be.



2. ábra: Kísérleti terv a „számozott jelű", különböző kiegészítőanyag tartalmú habarcs minták vizsgálatához
(ábrát készítette: Zsovár Zsófia Ilona szakmérnöki diplomamunka, konzulens: Dr. Kopecskó Katalin)

1. táblázat Cementkiegészítő anyagok megoszlása az egyes receptúrákban

keverék	CEM I 42,5 N-SR0, m%	MK1, m%	MK2, m%	SF, m%	MS, m%
R0	100%	0	0	0	0
111	90%	**10%**	0	0	0
112	83%	**17%**	0	0	0
113	95%	0	0	**5%**	0
114	90%	**7%**	0	**3%**	0
121	90%	0	**10%**	0	0
122	83%	0	**17%**	0	0
123	90%	0	**7%**	**3%**	0
131	95%	0	0	0	**5%**
132	90%	0	0	0	**10%**
133	83%	0	0	0	**17%**
134	90%	0	0	**3%**	**7%**

A habarcs próbatestek egy keverésre vonatkozó receptúráját a **2. táblázatban,** a 111 jelű habarcs próbatest receptúráján mutatjuk be. A habarcs receptúrák tekintetében követtünk egy korábbi kísérletsorozatban alkalmazott receptúrát, amelyben hasonló kiegészítő anyagok hatását tanulmányoztuk (Mlinárik – Kopecskó, 2014, 2016, 2017), de míg korábban nem szulfátálló (CEM I 42,5 N) normál portlandcementet alkalmaztunk, addig a jelen kísérletben szulfátálló (CEM I 42,5 N-SR0) portlandcementtel készítettük el a próbatesteket. A

szilikaport tartalmazó receptúrák esetében figyelembe vettük, hogy ez az anyag 50%-os vizes alapú szuszpenzióként állt rendelkezésünkre.

2. táblázat 111 jelű habarcs receptúra

111			
Anyag	Típus	Tömeg [kg/m^3]	Tömeg/keverék [kg/16 l]
Cement	CEM I 42,5 N-SR0	468	7,65
Cementkiegészítő anyag	Centrilit NC (10 %)	52	0,85
Homok	1/2	653	10,67
	0,2/1	686	11,21
	0,08/0,25 (F36)	294	4,80
Víz	v/c=0,4	208	3,40

Vizsgáltuk a keverékek hajlító-húzó- és nyomószilárdságát, ezáltal meg tudtuk határozni az egyes minták szilárdsági értékeinek változását a vizsgálati időtartamban. Vizsgáltuk az anyagok hidrotechnikai tulajdonságait, teljes elmerítéses vízfelvételi vizsgálat során meghatároztuk a vízfelvételt tömegszázalékban, majd az eredmények segítségével kiszámítottuk az egyes minták testsűrűségét és látszólagos porozitását. A kapilláris vízfelvétellel a vízfelvételi együtthatót határoztuk meg. Ezen kívül meghatároztuk a vizsgált minták pH értékét, végül gyors kloridion migrációs vizsgálatot végeztünk a különböző korú habarcs mintákon. A migrációs habarcskorongok felhasználásával meghatároztuk a kloridion behatolási görbéket, ahol a rétegmintákból a kötött és szabad kloridion tartalmat kémiai analitikai módszerekkel határoztuk meg.

3.2 Savkorróziós vizsgálatok megszilárdult pépkockákon

A megszilárdult pépkockák savkorróziós vizsgálata során a keverékek viselkedését 3 különböző savas körülményben vizsgáltuk: kénsav (pH=1), ecetsav (pH=3), tejsav (pH=3). A választott savas körülmények a leggyakoribb, betonnal kapcsolatba kerülő ásványi (kénsav), illetve szerves savak (ecetsav és tejsav). Keverékenként az egyes savas körülmények között tárolt próbatesteket kétféleképpen kezeltük, (i) abráziós hatással vagy (ii) anélkül: az abráziós kísérletben a savas oldatban tárolt kockák felületét hetente kétszer lekeféltük, amivel a reakciótermékeket és az esetlegesen fellazuló részeket eltávolítottuk; a kockák másik csoportját abráziós hatás nélkül vetettük alá a savas kezelésnek. Oldatcsere hetente történt. A (kezelőszer térfogat/próbatest térfogat) arány ~tízszeres volt. A kezelést követően a próbatesteket 50 °C-on kiszárítottuk, majd 90 napos korban mértük a minták méreteit és tömegét, végül a pépkockákon elvégeztük a nyomószilárdsági vizsgálatot. Feltételezhetjük, hogy a kémiai ellenállóképesség tömegváltozáson alapuló tanulmányozása esetében a tömegcsökkenés vezet kedvezőtlen változásokhoz, mert hamarabb fogy a kötőanyag, amely a szilárdságot is biztosítja.

Az egyes keverékek referencia próbatestjeit (V) vízben tároltuk. A vízben tárolt próbatesteken mért tömegváltozáshoz viszonyítottuk a savas közegben kezelt próbatestek tömegváltozását. Ez azt is jelenti, hogy nem a kiindulási (28 napos korban mért) tömegekhez viszonyítottuk a változásokat, hanem az azonos korú, folyamatosan hidratálódó pépkockák tömegéhez. A vízben tárolt mintákon nem cseréltük a vizet, hogy megelőzzük a kalcium-hidroxid jelentősebb kioldódását. A vizes tárolással a viszonylag nagy fajlagos felülettel rendelkező kis pépkockák karbonátosodását is kiküszöböltük.

A kezelések megkülönböztetésére a következő jelöléseket alkalmaztuk:

- EN: ecetsavban tárolt próbatestek (abráziós hatás nélkül),
- EK: ecetsavban tárolt próbatestek (abráziós hatással),
- KN: kénsavban tárolt próbatestek (abráziós hatás nélkül),
- KK: kénsavban tárolt próbatestek (abráziós hatással),
- TN: tejsavban tárolt próbatestek (abráziós hatás nélkül),
- TK: tejsavban tárolt próbatestek (abráziós hatással),
- V: vízben tárolt próbatestek.

Az ecetsavban tárolt pépkockák makroszkópikus változását láthatjuk a **3. ábrán**, valamint az próbatestek tömegváltozását, abráziós hatás nélkül (**4. ábra**), vagy abráziós hatással (**5. ábra**), a vízben tárolt azonos korú és kötőanyagú próbatestek tömegéhez viszonyítva.

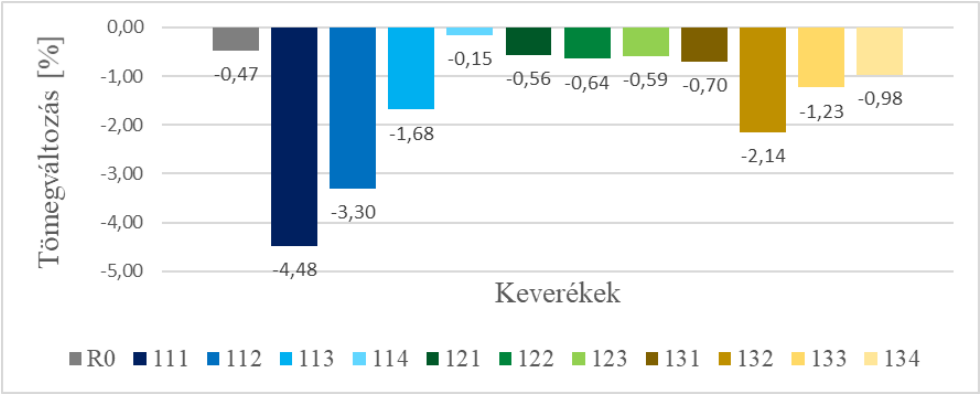


3. ábra: Ecetsavban tárolt próbatestek,
(felső sorban abráziós hatással, alsó sorban abráziós hatás nélkül)

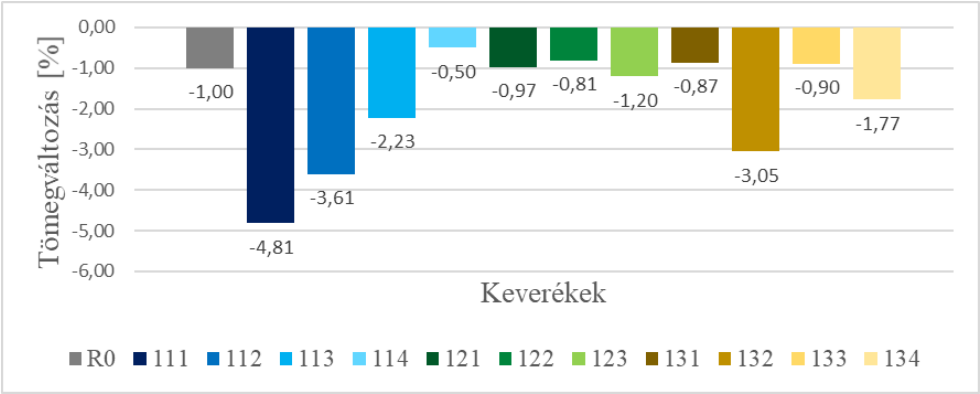
Az *ecetsav a cementkő oldódásos korrózióját okozza*, hatására nem keletkezik a kénsav esetében tapasztalható, csapadék jellegű reakciótermék a pépkockák felületén (Balázs et al., 2019). Ellenben, az ecetsav hatására keletkező reakciótermék, a kalcium-acetát ($(CH_3COO)_2Ca$) nagyon jó oldhatósága biztosítja, hogy megfelelő (kezelőszer térfogat/próbatest térfogat) arány mellett oldott formában az oldatba kerüljön, ezzel is csökkentve a próbatest tömegét. Hosszú időtartamú, vagy koncentrált hatás esetén az ecetsav a cementkőben található összes $Ca(OH)_2$-t (portlanditot) elfogyaszthatja, majd ezt követően a CSH (kalcium-szilikát hidrát) fázisokat kezdi el elbontani. Ez az ún. dekalcinálási folyamat egyúttal amorf kovasav képződéséhez is vezet, valamint a szilárdság csökkenését eredményezi. Mindemellett a cementkő térfogatilag is zsugorodik (Mlinárik - Kopecskó, 2014; 2016).

Az ecetsavas kezelés esetében figyelhető meg leginkább az összefüggés a keverékek tömegváltozása és a keverékek összetétele között. Az ecetsavas kezelés hatására minden keverék veszített a tömegéből. Az abráziós és abrázió nélküli kezelés eredményei között nincs jelentős különbség, nagyobb eltérés csak a 134 esetében látható, ez is bizonyítja az ecetsav hatására végbemenő korrózió oldódásos jellegét. A legnagyobb tömegveszteséget a MK1 metakaolin kisebb (10 m%-os) adagolása esetén tapasztaltuk, azonban az MK1 adagolás növelésével (17 m%) a minták átlagos tömegcsökkenése arányosan csökkent. A mikroszilika önmagában (113; 5 m% SF) történő adagolásának eredménye kevésbé kedvező, mint a kombinált alkalmazása (114, 123 és 134). Ugyanakkor a 134-es keverék az abráziós hatásnak kevésbé állt ellen. Ecetsavas kezelés hatására a 114-es keverék (7 m% MK1 + 3% m% SF)

esetében kaptuk a legkisebb tömegcsökkenést, tehát a legkedvezőbb eredményt. Az MK2-t tartalmazó mintákon mért változások jóval kisebbek, mint a hasonló adagolású MK1 keverékek esetén; az Az MK2-t tartalmazó minták tömegveszteségei közelítőleg megegyeznek a referencia kockákon mért értékekkel, valamint megállapítható, hogy az adagolás növelése nem hozott jelentős javulást (**4-5. ábra**).



4. ábra: Ecetsavban tárolt próbatestek tömegváltozása, abráziós hatás nélkül, a vízben tárolt azonos korú és kötőanyagú próbatestek tömegéhez viszonyítva



5. ábra: Ecetsavban tárolt próbatestek, abráziós hatással, a vízben tárolt azonos korú és kötőanyagú próbatestek tömegéhez viszonyítva

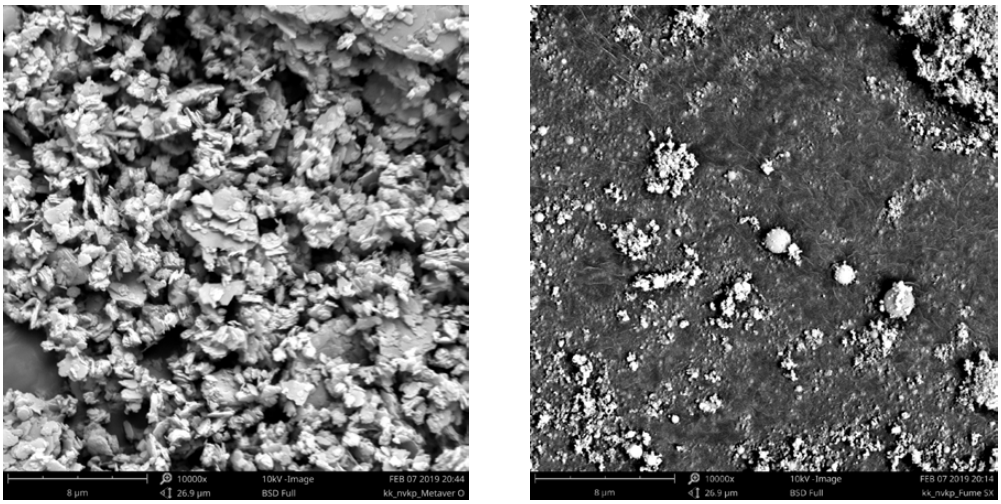
Az ecetsavas kezelés hatására a szűrt kőszénpernyét (MS) tartalmazó keverékek közül a 10 m% (132) helyettesítéssel készült kockák tömegveszteségei lettek a legnagyobbak. A jelenség okainak tisztázása további elemzést igényel, azonban azt megállapíthatjuk, hogy a pépkockákon 1 éves korban elvégzett higany-intrúziós porozimetriai eredmények alapján 132-es minta nem rendelkezett kiugróan nagy fajlagos felülettel, összporozitással vagy egyéb porozimetriai jellemzővel, és a testsűrűség értéke sem támasztja alá az ellenállóképességben mutatott anomáliát (**3. táblázat**).

A **3. táblázat** adatainak elemzése alapján megállapíthatjuk, hogy a kiegészítő anyagok többnyire csökkentették az összporozitást (V/V%), valamint többnyire növelték a fajlagos felületet. A 17%-os MK2 (122) és az MS keverékek kivételével mindegyik adagolás finomította a porozitást, a leggyakoribb pórusátmérő intervallum kisebb értékek felé tolódott.

Az SF (mikroszilika) adagolás önmagában is, és más kiegészítő anyaggal kombinálva is a leghatékonyabban finomította a jellemző pórusátmérő tartományt. Ez összefüggésben lehet azzal, hogy ennek az anyagnak a legfinomabb a szemcsemérete (**6. ábra**), és a szuszpenzió formában történő adagolás hatására a szemcsék aggregálódása korlátozott.

3. táblázat Az 1 éves korú kötőanyag pépminták jellemzői a higanyos porozimetria vizsgálat eredményei alapján (*A higany nedvesítési szöge alapján számolt érték. A vizsgálatokat végezte és értékelte a SZIKKTI Kft.)

Keverék, kora: 1 év	Vizsgált jellemzők, MIP					
	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő, nm	Kumulatív pórustérfogat, cm^3/g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület* m^2/g	Anyag-sűrűség, g/cm^3
R0	201,3 μm – 3,6 nm	54,3 – 34,0	0,0995	19,17	12,11	2,45
111	201,3 μm – 3,6 nm	42,4 – 31,7	0,1025	18,15	17,38	2,44
113	189,4 μm – 3,6 nm	42,8 – 32,1	0,0947	17,38	22,19	2,45
114	189,4 μm – 3,6 nm	36,8 – 25,8	0,0992	17,94	24,97	2,45
121	208,1 μm – 3,6 nm	39,7 – 27,9	0,0757	14,46	12,68	2,42
122	208,1 μm – 3,6 nm	69,9 – 36,6, 4,5 – 3,6	0,1494	24,04	38,25	2,29
123	185,7 μm – 3,6 nm	46,0 – 30,2	0,0871	15,86	16,51	2,42
131	185,7 μm – 3,6 nm	64,3 – 38,1	0,0949	17,61	9,32	2,41
132	220,4 μm – 3,6 nm	57,1 – 36,1	0,0918	17,16	10,18	2,38
133	220,4 μm – 3,6 nm	50,2 – 25,3	0,0957	17,16	21,19	2,40



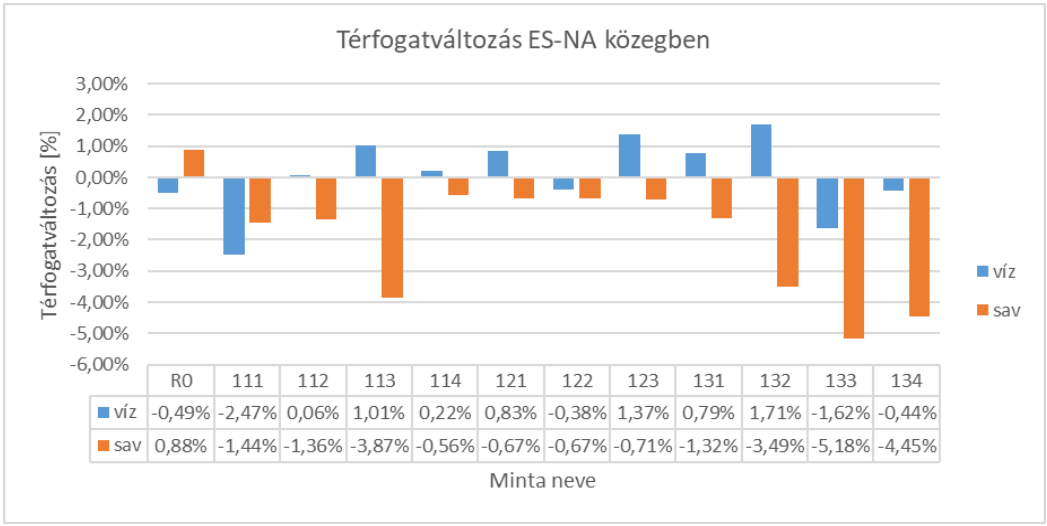
6. ábra: Metakaolin (balra) és mikroszilika (jobbra) pásztázó elektron mikroszkópos felvétele, nagyítás: 10000x (készítette: Kopecskó Katalin)

Az ecetsavas közegben, valamint vízben tárolt próbatestek térfogatváltozását is elemeztük, a savas környezetben abráziós hatás nélkül (**7. ábra**), vagy abráziós hatással (**8. ábra**). A 90 napos kori értékeket a 28 napos kori kiindulási méretekből számított térfogatokhoz viszonyítottuk.

Az ecetsavas környezetben az abrázió mentes kezelésnek (**7. ábra**), valamint az abráziós kezelésnek (**8. ábra**) is egyértelműen térfogat csökkentő hatása van, egy kivétellel, az R0 mintacsoportra abrázió mentes kezeléssel a kísérlet időtartama alatt duzzadás volt jellemző. Meg kell jegyezni, korábbi, hosszú időtartamú kísérleteinkre alapozva, hogy hosszabb savas kezelés következtében a tiszta portlandcement esetében is zsugorodásra lehet számítani (Mlinárik - Kopecskó, 2016).

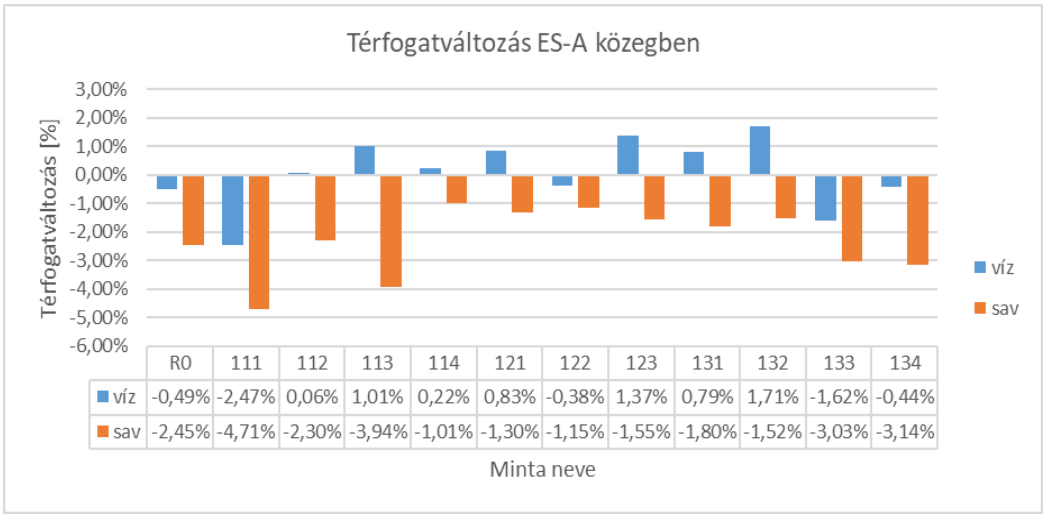
A kötőanyag pépkockákon elvégzett savkorróziós kísérletek megállapításai a tömegváltozás alapján: az abrázió mentes ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, R0, 121, 123, 122, 131, 134; abráziós kezeléssel az ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, 122, 131, 133, 121, R0, 123.

A kötőanyag pépkockákon elvégzett savkorróziós kísérletek megállapításai a térfogatváltozás alapján: az abrázió mentes ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, 121, 122, 123, R0, 131; abráziós kezeléssel az ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, 122, 121, 132, 123. Mindent összevetve a 114, 121, 122 és 123 (SF, MK2 és MK2/SF) keverékek bizonyultak az ecetsavas környezetben leginkább ellenállónak.



	R0	111	112	113	114	121	122	123	131	132	133	134
víz	-0,49%	-2,47%	0,06%	1,01%	0,22%	0,83%	-0,38%	1,37%	0,79%	1,71%	-1,62%	-0,44%
sav	0,88%	-1,44%	-1,36%	-3,87%	-0,56%	-0,67%	-0,67%	-0,71%	-1,32%	-3,49%	-5,18%	-4,45%

7. ábra: Ecetsavban tárolt próbatestek, abráziós hatás nélkül, a térfogatok a 28 napos kori kiindulási térfogatokhoz viszonyítva



	R0	111	112	113	114	121	122	123	131	132	133	134
víz	-0,49%	-2,47%	0,06%	1,01%	0,22%	0,83%	-0,38%	1,37%	0,79%	1,71%	-1,62%	-0,44%
sav	-2,45%	-4,71%	-2,30%	-3,94%	-1,01%	-1,30%	-1,15%	-1,55%	-1,80%	-1,52%	-3,03%	-3,14%

8. ábra: Ecetsavban tárolt próbatestek, abráziós hatással, a térfogatok a 28 napos kori kiindulási térfogatokhoz viszonyítva

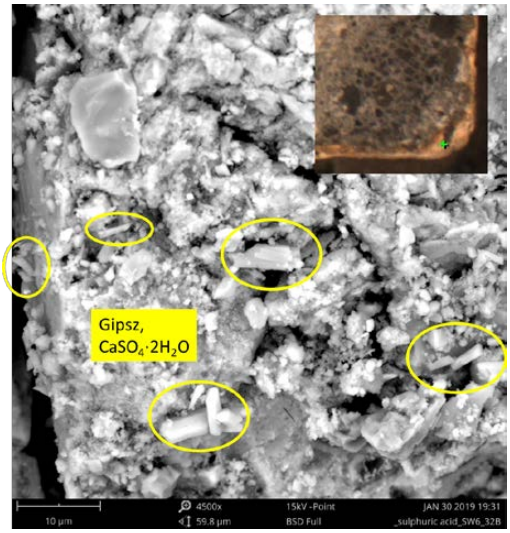
A kénsavban tárolt pépkockák makroszkópikus változását láthatjuk a **9. ábrán.** Amíg *kénsav* tartalmú vizek és szennyvizek, gázok, gőzök, permetek a beton *a reakciótermékek duzzadásával kísért oldódásos kénsavkorrózióját* okozhatják, addig a sótartalmú talajok, talajvizek, felszíni vizek oldott szulfátionjai (SO_4^{2-}) duzzadásos szulfátkorrózióra vezethetnek. Szulfát-ion többnyire megtalálható a természetes vizekben is, mint a kalcium- és magnézium-ion kísérője. Jól oldódó vegyületeket képező szulfát sók a Na-szulfát (Na_2SO_4) és Mg-szulfát ($MgSO_4$). Kalcium-ionnal képzett sójának, a gipsznek ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) rossz az oldhatósága (Balázs et al., 2019).



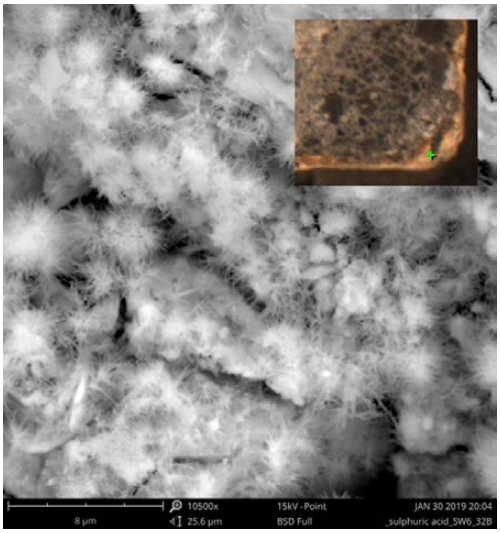
9. ábra: Kénsavban tárolt próbatestek,
(felső sorban abráziós hatással, alsó sorban abráziós hatás nélkül)

Ha összehasonlítjuk a **3.** és a **9. ábrán** látható próbatestek (113; 5% SF) színét, láthatjuk, hogy ugyanannak a receptúrának a szürkés árnyalatú próbatestjei elfehéredtek a kénsavas közegben, mind az abrázió nélküli, mind az abráziós kezeléssel. Ez összefüggésben van azzal, hogy egyes keverékek tömege nőtt, az abráziós hatás ellenére is. A gipsz, mint elsődleges reakciótermék, nem kizárólag a külső felületen, de a felülettel összeköttetésben levő pórusokban is keletkezhet, ezt a kézi abráziós hatással bizonyosan nem lehet eltávolítani. Azt is megfigyelhetjük, hogy az abráziós hatás nélkül kezelt próbatestek felületén laza, lemezes, néhol porszerű kristályos (gipsz) réteg alakult ki, és amelynek megjelenése az éleken és

sarkokon járt jelentősebb elváltozásokkal. Feltételezhetjük, hogy ennek, a könnyen eltávolítható rétegnek a reakciósebességet csökkentő hatása lehet, ugyanis a rétegen keresztül a sav a cementkőig csak lassú diffúzió útján tud behatolni. Ugyanakkor, a duzzadás hatására helyenként leváló rétegek pozitív hatására hosszú távon nem lehet számítani. További hatásként a duzzadást okozó másodlagos ettringit képződésével lehet számolni. Az említett reakciótermékek jelenlétét a kénsavasan kezelt vizsgálati minták pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálatával alátámasztottuk (**10.a és 10.b ábra**).



10.a ábra: Kénsavval kezelt próbatestek, gipsz kristályok megjelenése a reakciózónában, nagyítás: 4500x
(SEM felvételt készítette: Kopecskó Katalin)

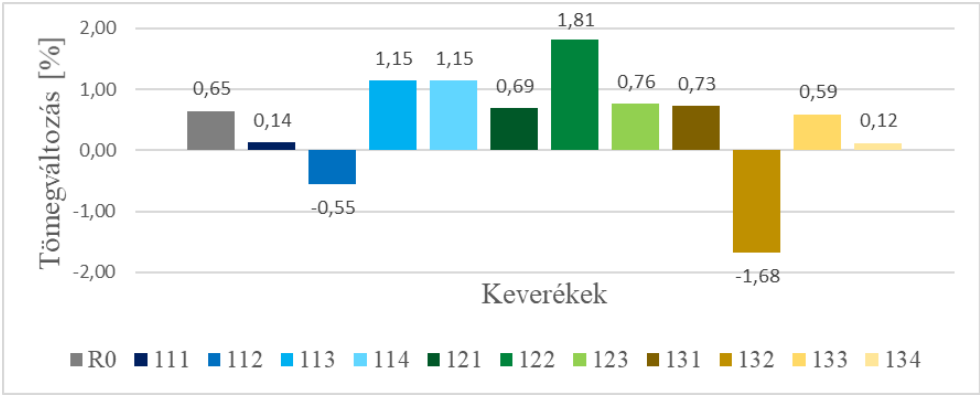


10.b ábra: Kénsavval kezelt próbatestek, ettringit tűkristályok megjelenése a reakciózónában, nagyítás: 10500x
(SEM felvételt készítette: Kopecskó Katalin)

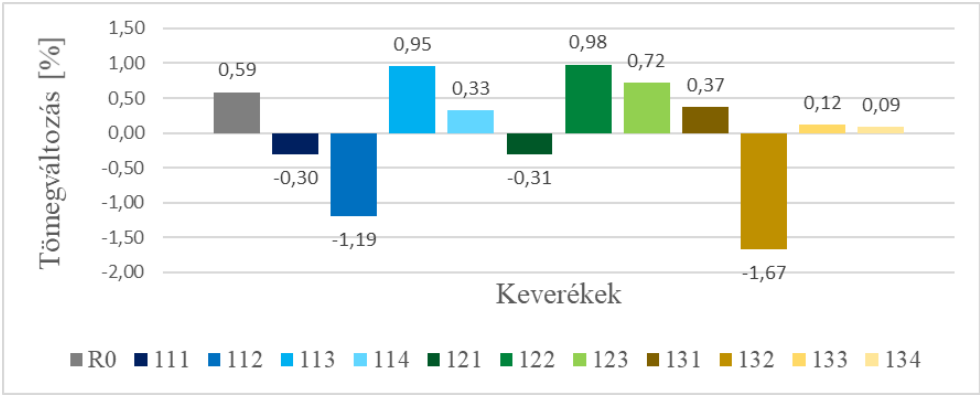
A kénsavban tárolt próbatestek tömegváltozását értékeltük, abráziós hatás nélkül (**11. ábra**), vagy abráziós hatással (**12. ábra**), a vízben tárolt azonos korú és kötőanyagú próbatestek tömegéhez viszonyítva.

A kénsavas kezelésnek kitett kockákon, amelyek nem lettek abráziós hatásnak kitéve, két keverék kivételével, tömegnövekedést figyelhettünk meg. Ez a változás elsősorban a kockák felületén képződő gipsznek, majd a szulfát hatására bekövetkező másodlagos ettringit képződésnek köszönhető (Mlinárik - Kopecskó, 2014; 2016). A legnagyobb tömegnövekedést a 122-es jelű keveréken mértünk (MK2, 17%), ez közel háromszorosa a referencián mért értéknek. Szintén jelentős tömegnövekedés figyelhető meg további két keveréken: 113 (5 m% SF) és 114 (7 m% MK1 + 3 m% SF). A legnagyobb mértékű tömegcsökkenést a 132-es keveréken tapasztaltuk (10 m% MS), ennél kisebb mértékű tömegcsökkenés a 112-es keveréken volt megfigyelhető (17 m% MK1) (**11. ábra**).

Ha összehasonlítjuk az ecetsav és a kénsav hatását (abrázió nélkül), észre vehető, hogy a kétféle metakaolin eltérő módon viselkedik a két különböző közegben: az MK1 tömegváltozása kisebb mértékű a kénsavas közegben, mint az MK2 keverékeké; ugyanakkor ecetsavban pedig az MK2 keverékek tömegváltozása kisebb mértékű.



11. ábra: Kénsavban tárolt próbatestek, abráziós hatás nélkül



12. ábra: Kénsavban tárolt próbatestek, abráziós hatással

Abráziós hatás esetében a tömegnövekedéssel járó változások mértéke csökkent. Ez magának az eljárásnak tudható be, hiszen – ahogy említettük – a keletkező reakciótermék egy része nem a pórusokban, vagy a cementkő szövetében van, hanem a felületen, viszonylag laza csapadék formájában van jelen. Ez a réteg távolítható el többé-kevésbé az abráziós módszerrel. Az abrázió hatására két további keverék esetében is tömegcsökkenés jött létre: 111 (10 m% MK1) és 121 (10 m% MK2). A legnagyobb mértékű tömegcsökkenést továbbra is a 132-es keveréken tapasztaltuk (10 m% MS), valamint a 132-nél kisebb mértékű tömegcsökkenés a 112-es keveréken volt megfigyelhető (17 m% MK1) (**12. ábra**). Az abráziósan kezelt csoportok esetében, a tömegnövekedések csökkentek, a tömegcsökkenések nőttek, tehát minden vizsgálati csoport esetében csökkentek az abszolút tömegek.

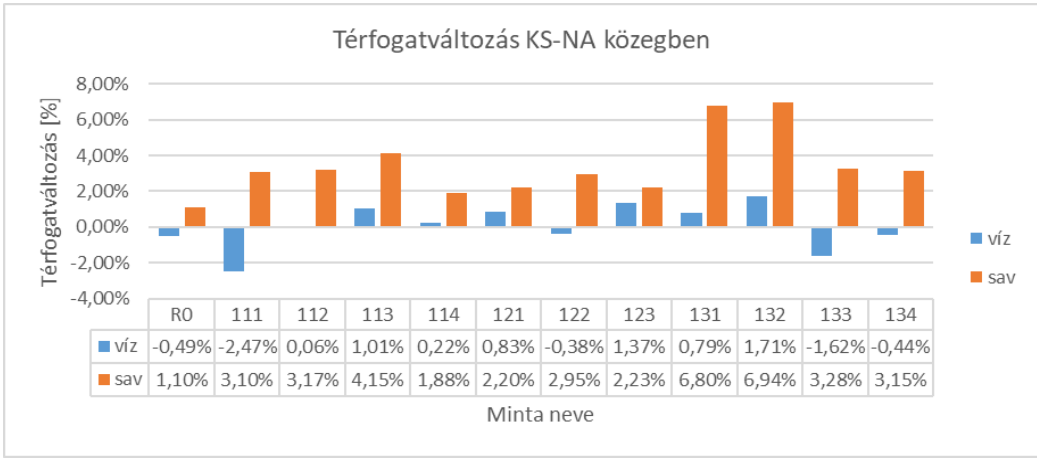
A kötőanyag pépkockákon elvégzett savkorróziós kísérletek megállapításai a tömegváltozás alapján: az abrázió mentes kénsavas környezetben a legkisebb tömegváltozást szenvedő keverékek (csökkenő sorrendben): 111, 134, 112, 133, R0, 121; abráziós kezeléssel a kénsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 134, 133, 111, 121, 114, 131.

A kénsavas közegben, valamint vízben tárolt próbatestek térfogatváltozását is elemezhetjük: a savas környezetben abráziós hatás nélkül (**13. ábra**), vagy abráziós hatással (**14. ábra**). A 90

napos kori értékeket a 28 napos kori kiindulási méretekből számított térfogathoz viszonyítottuk.

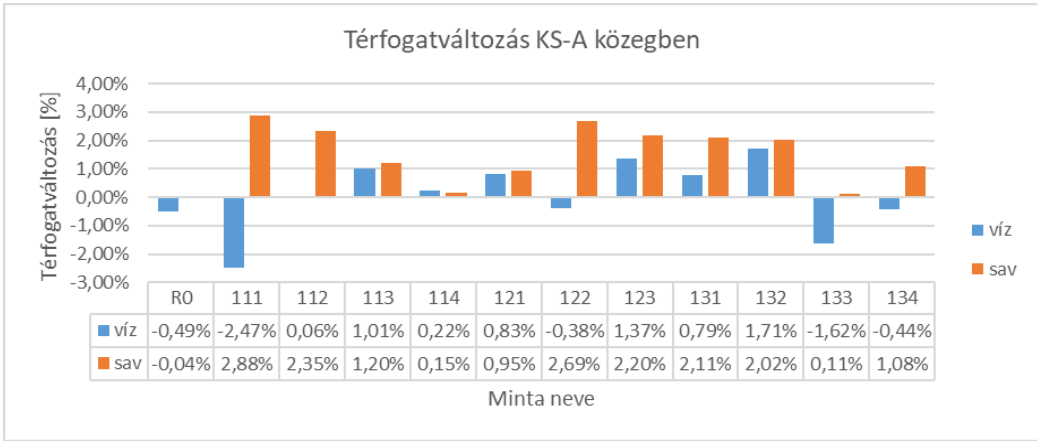
A **13. ábrán** látható értékelés alapján megállapíthatjuk, hogy a kénsavas közeg abráziós hatás nélkül minden kötőanyag keverék esetében duzzadást hozott létre, ez az R0 referencia (szulfátálló cement) minta esetében a legkisebb mértékű, míg az 5, illetve 10 % kőszénpernyét tartalmazó keverékekben a legjelentősebb, a térfogatváltozás közel 7 %-os. Mint az várható volt, az abráziós hatással a térfogatnövekedések mérséklődnek, a térfogatcsökkenések tovább nőttek (**14. ábra**).

A kötőanyag pépkockákon elvégzett kénsavas savkorróziós kísérletek megállapításai a térfogatváltozás alapján: az abrázió mentes kénsavas környezetben az R0, 114, 123, 121, 122 keverékek szenvedték el a legkisebb térfogatváltozást; míg az abráziós eljárással a kénsavas környezetben az R0, 133, 114, 121, 134 keverékek szenvedték el a legkisebb térfogatváltozást.



	R0	111	112	113	114	121	122	123	131	132	133	134
víz	-0,49%	-2,47%	0,06%	1,01%	0,22%	0,83%	-0,38%	1,37%	0,79%	1,71%	-1,62%	-0,44%
sav	1,10%	3,10%	3,17%	4,15%	1,88%	2,20%	2,95%	2,23%	6,80%	6,94%	3,28%	3,15%

13. ábra: Kénsavban tárolt próbatestek, abráziós hatás nélkül, a térfogatok a 28 napos kori kiindulási térfogatokhoz viszonyítva



	R0	111	112	113	114	121	122	123	131	132	133	134
víz	-0,49%	-2,47%	0,06%	1,01%	0,22%	0,83%	-0,38%	1,37%	0,79%	1,71%	-1,62%	-0,44%
sav	-0,04%	2,88%	2,35%	1,20%	0,15%	0,95%	2,69%	2,20%	2,11%	2,02%	0,11%	1,08%

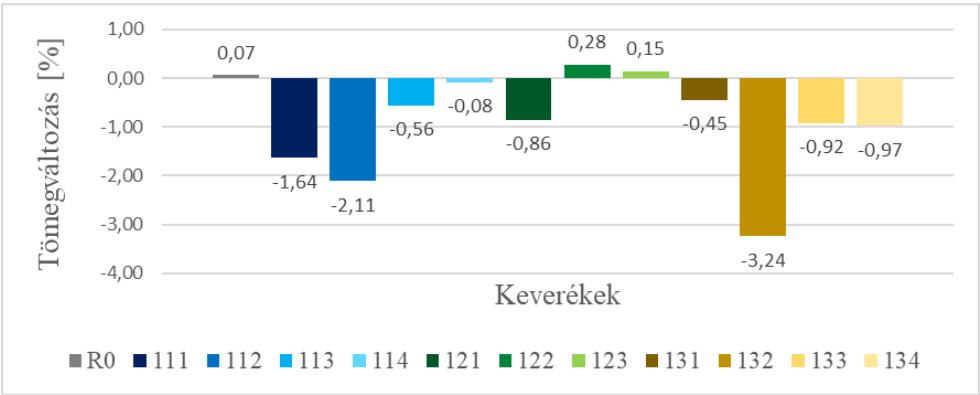
14. ábra: Kénsavban tárolt próbatestek, abráziós hatással, a térfogatok a 28 napos kori kiindulási térfogatokhoz viszonyítva

A tejsavban tárolt pépkockák makroszkópikus megjelenését láthatjuk a **15. ábrán**, valamint a próbatestek tömegváltozását, abráziós hatás nélkül (**16. ábra**), vagy abráziós hatással (**17. ábra**), a vízben tárolt azonos korú és kötőanyagú próbatestek tömegéhez viszonyítva. A tejsavas közegben vizsgált pépkockák makroszkópikus megjelenésében különösebb elváltozások nem figyelhetők meg.

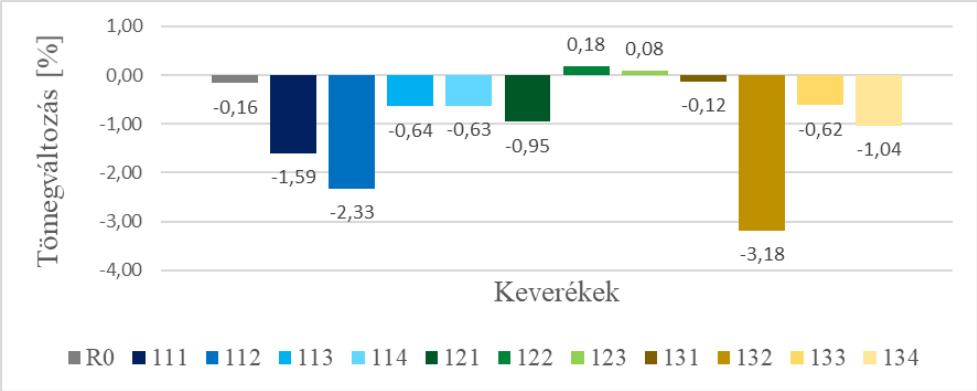


15. ábra: Tejsavban tárolt próbatestek,
(felső sorban abráziós hatással, alsó sorban abráziós hatás nélkül)

A tejsavas kezelés esetében az abrázió nélküli/abráziós kezelés hatásában nem mutatkozott jelentős különbség. Tejsavban tárolt kockák esetében a legkisebb változások a referencia (R0) és a 121, 122, valamint 123 (mindhárom MK2 tartalmú) keverék esetében tapasztaltuk, mind abráziós, mind abrázió nélküli kezeléssel. A legnagyobb tömegveszteség az MS szűrt kőszénpernyét 10 m%-ban tartalmazó keverék esetében mutatkozott. Az MK1 metakaolin alkalmazása esetén a 17 m%-ot tartalmazó (112) mintákon mért tömegcsökkenés mutatkozott a legnagyobbnak, míg a szilikaporral kombinált keverék (114, 7% MK1 + 3%SF) a legkisebbnek. MK2-t 17%-os helyettesítéssel alkalmazva (122), illetve szilikaporral kombinálva (123), a vízben tárolt kockákhoz viszonyítva a tömegváltozás pozitív előjelű lett, azaz tömegnövekedést tapasztaltunk (**16.** és **17. ábra**).

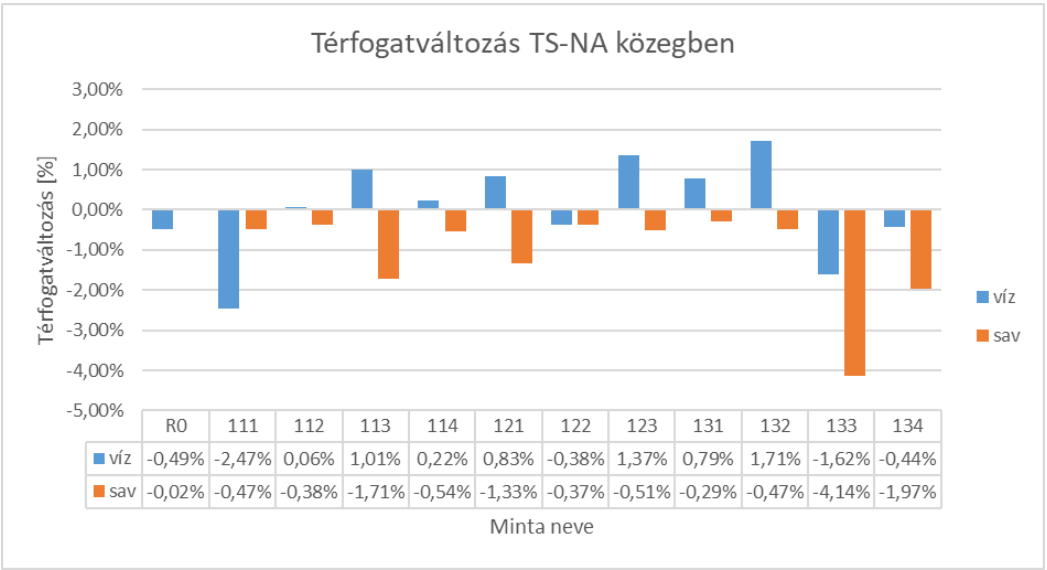


16. ábra: Tejsavban tárolt próbatestek, abráziós hatás nélkül



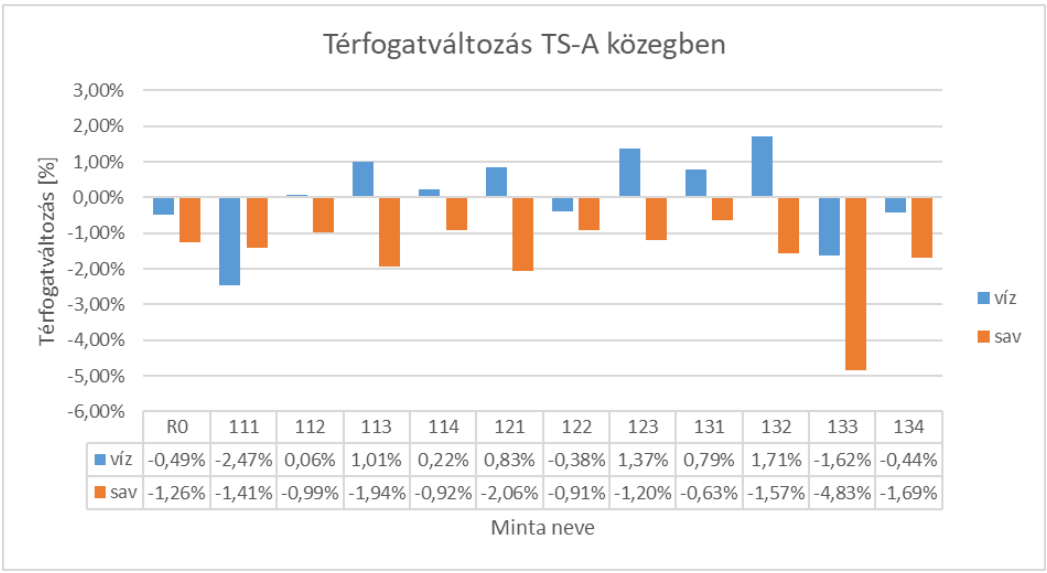
17. ábra: Tejsavban tárolt próbatestek, abráziós hatással

Térfogatváltozás tekintetében a tejsavas közegben kezelt, valamint vízben tárolt próbatestek változását is elemeztük: a savas környezetben abráziós hatás nélkül (**18. ábra**), vagy abráziós hatással (**19. ábra**). A 90 napos kori értékeket a 28 napos kori kiindulási méretekből számított térfogathoz viszonyítottuk. Megfigyelhetjük, hogy a tejsavas közeg minden kötőanyag keverék esetében térfogatcsökkenést okozott. A legkisebb térfogatváltozást (-0,02 %) az R0 referencia minta esetében mértük, az abráziós hatás nélküli kezeléssel. A legnagyobb térfogatcsökkenés a 133-as keverék esetében volt tapasztalható (17% MS).



	R0	111	112	113	114	121	122	123	131	132	133	134
víz	-0,49%	-2,47%	0,06%	1,01%	0,22%	0,83%	-0,38%	1,37%	0,79%	1,71%	-1,62%	-0,44%
sav	-0,02%	-0,47%	-0,38%	-1,71%	-0,54%	-1,33%	-0,37%	-0,51%	-0,29%	-0,47%	-4,14%	-1,97%

18. ábra: Tejsavban tárolt próbatestek, abráziós hatás nélkül, a térfogatok a 28 napos kori kiindulási térfogatokhoz viszonyítva



	R0	111	112	113	114	121	122	123	131	132	133	134
víz	-0,49%	-2,47%	0,06%	1,01%	0,22%	0,83%	-0,38%	1,37%	0,79%	1,71%	-1,62%	-0,44%
sav	-1,26%	-1,41%	-0,99%	-1,94%	-0,92%	-2,06%	-0,91%	-1,20%	-0,63%	-1,57%	-4,83%	-1,69%

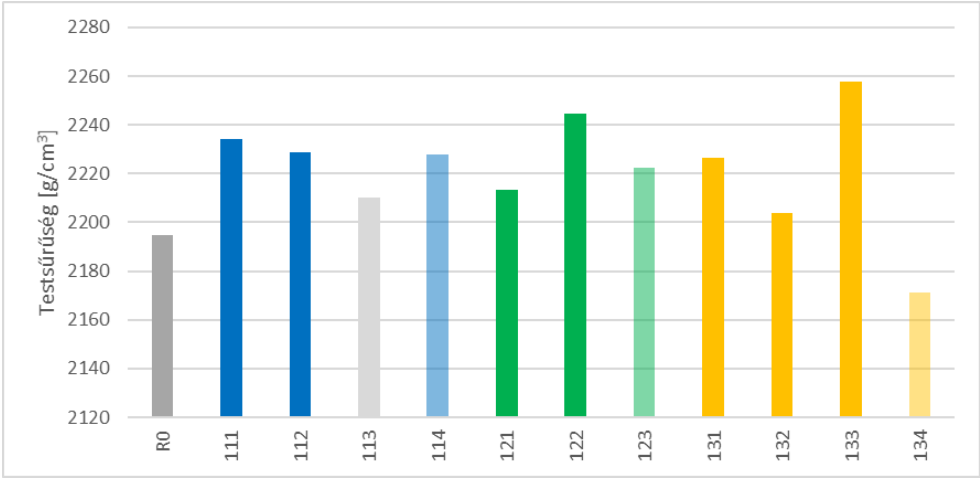
19. ábra: Tejsavban tárolt próbatestek, abráziós hatással, a térfogatok a 28 napos kori kiindulási térfogatokhoz viszonyítva

3.2 A kiegészítő anyag tartalmú habarcsok vizsgálati eredményei

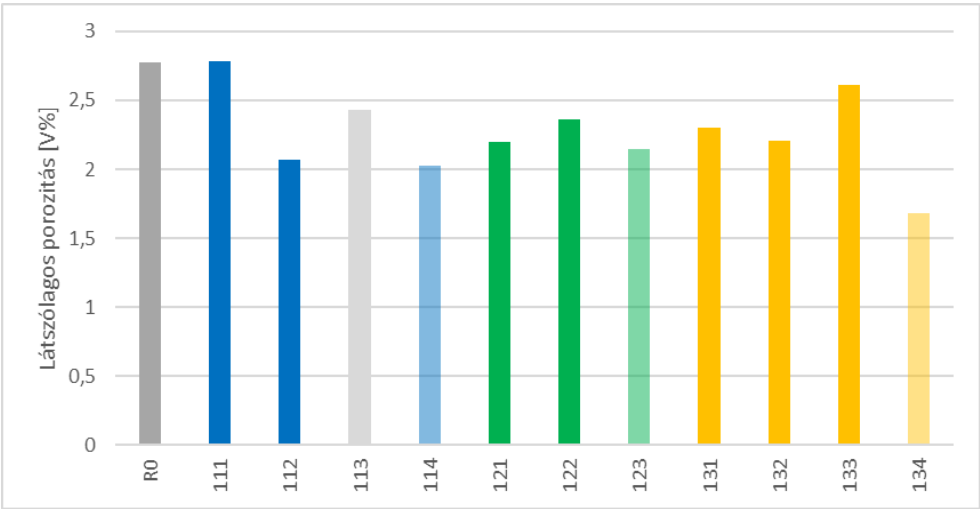
A **20-21. ábrán** a habarcs próbatestek egy éves kori testsűrűség és látszólagos porozitás értékeit gyűjtöttük össze, ez utóbbit a teljes elmerítéses vízfelvételi vizsgálat eredményeiből számoltunk ki. A kiegészítőanyag adagolás és a testsűrűség, illetve látszólagos porozitás értékek között nem állapítható meg szoros összefüggés, azonban a szilikapor hatásáról elmondható, hogy mindegyik kiegészítő anyag hármas – ternary – keverékében csökkentette a habarcs látszólagos porozitását (114, 123, 134 keverékek).

Vizsgáltuk a habarcsokon a kapilláris vízfelvétel alakulását is. Egy éves korra minden keverék kapilláris vízfelvétele kisebb lett, mint az R0 referencia próbatesté. A kapilláris vízfelvétel esetében a látszólagos porozitásnál leírtak igazolódtak: megfigyeltük, hogy minden egyes kiegészítő anyag esetében akkor értük el a legkedvezőbb esetet, ha a kiegészítőanyagot szilikapor szuszpenzióval együttesen alkalmaztuk, tehát úgynevezett hármas – ternary – kötőanyag keverékkel készült a minta (114, 123, 134 keverékek). Elmondhatjuk, hogy a kapilláris vízfelvétel esetében, míg az MK1 esetén a nagyobb mennyiségű kiegészítő anyag alkalmazása (112) pozitív hatású (tehát csökkenti a kapilláris vízfelvételt), addig az MK2-nél és MS-nél 10%-os adagolása a kedvezőbb (121, 132).

A **4. táblázatban** gyűjtöttük össze az egy éves korú habarcsminták porozimetriai jellemzőit. Figyelemre méltó, hogy a cement kiegészítő anyagok adagolása a habarcsok esetében is többnyire finomítja a leggyakoribb pórusátmérő tartományt (111, 112, 113, 114, 121 és 132), a tartománynak mind a felső, mind az alsó értékét kisebb pórusátmérők irányába tolja. Ugyanakkor az összporozitás nem minden kiegészítőanyag fajta és adagolás mellett csökken, pl. a 111, 122, 133 és 134 esetében az összporozitás értéke az R0 referencia esetében mértnél nagyobb érték.

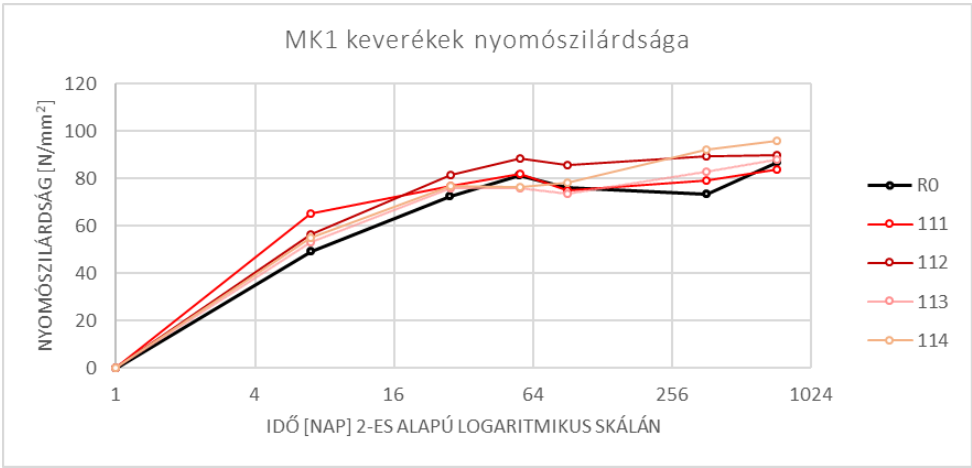


20. ábra: A habarcs próbatestek testsűrűsége egy éves korban



21. ábra: A habarcs próbatestek látszólagos porozitása egy éves korban

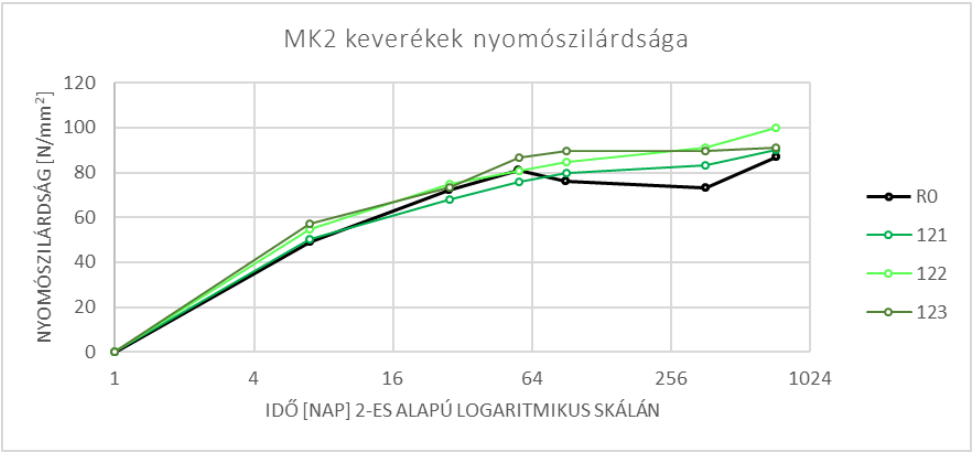
A habarcs keverékeken szilárdsági vizsgálatokat is végeztünk. Ezekből a vizsgálati eredményekből kötőanyag típusonként a nyomószilárdsági vizsgálatok eredményét mutatjuk be (**22-24. ábra**).



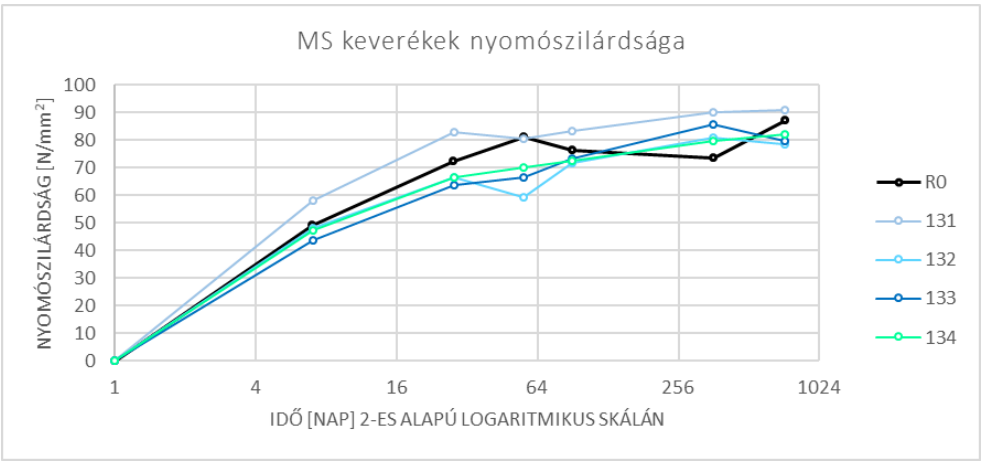
22. ábra: Az MK1 kötőanyag tartalmú habarcs próbatestek nyomószilárdságának alakulása, 2 éves korig vizsgálva

4. táblázat Az 1 éves korú különböző kiegészítő anyag tartalmú habarcsminták jellemzői a higanyos porozimetria vizsgálat eredményei alapján (*A higany nedvesítési szöge alapján számolt érték. A vizsgálatokat végezte és értékelte a SZIKKTI Kft.)

Keverék, kora: 1 év	Vizsgált jellemzők, MIP					
	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő, nm	Kumulatív pórustérfogat, cm^3/g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület* m^2/g	Anyag-sűrűség, g/cm^3
R0	186,5 µm – 3,6 nm	122,6 – 40,5	0,0435	10,07	1,52	2,60
111	193,8 µm – 3,6 nm	44,1 – 29,1	0,0470	10,49	5,58	2,60
112	193,8 µm – 3,6 nm	73,5 – 32,6	0,0403	9,12	5,58	2,60
113	208,2 µm – 3,6 nm	67,8 – 27,7	0,0371	8,50	2,80	2,59
114	197,0 µm – 3,6 nm	58,4 – 21,1	0,0428	9,64	5,28	2,61
121	186,5 µm – 3,6 nm	96,2 – 3,6	0,0424	9,67	7,52	2,61
122	200,0 µm – 3,6 nm	107,0 – 27,1	0,0456	10,29	5,40	2,61
123	183,0 µm – 3,6 nm	104,7 – 33,2	0,0368	8,39	3,22	2,59
131	215,7 µm – 3,6 nm	127,8 – 43,5	0,0399	9,08	2,25	2,62
132	200,0 µm – 3,6 nm	84,1 – 27,3	0,0399	9,16	3,69	2,62
133	197,0 µm – 3,6 nm	101,6 – 35,8	0,0463	10,68	5,36	2,62
134	215,7 µm – 3,6 nm	101,0 – 37,4	0,0462	10,42	4,56	2,60

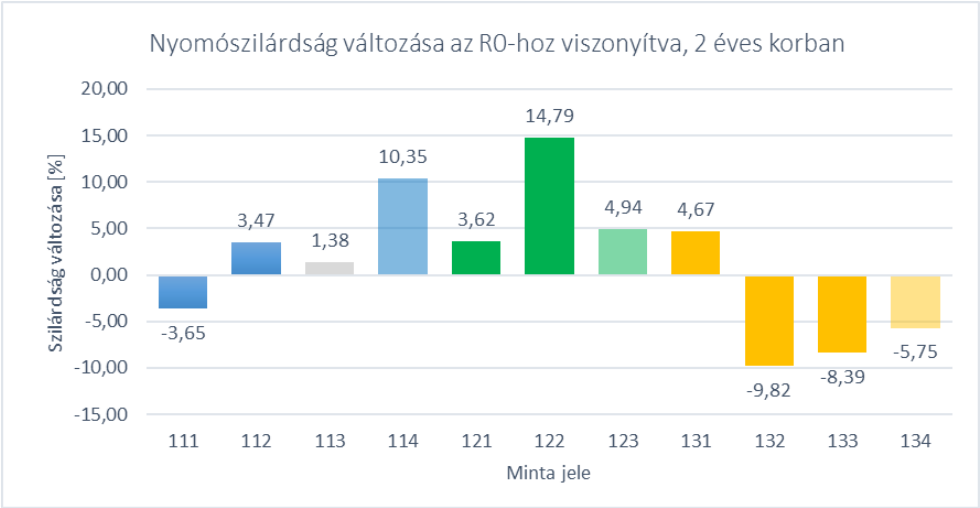


23. ábra: Az MK2 kötőanyag tartalmú habarcs próbatestek nyomószilárdságának alakulása, 2 éves korig vizsgálva



24. ábra: Az MS kötőanyag tartalmú habarcs próbatestek nyomószilárdságának alakulása, 2 éves korig vizsgálva

A vizsgálati eredményekből megállapítható, hogy két éves korra a legtöbb minta nyomószilárdsága nagyobb, mint az R0 referencia habarcs nyomószilárdsága. Kivételt képeznek a 111-es és egyes MS (szűrt kőszénpernye) kiegészítőanyag tartalmú próbatestek; ezek esetében ~4-10%-kal kisebb eredményeket kaptunk (**25. ábra**).

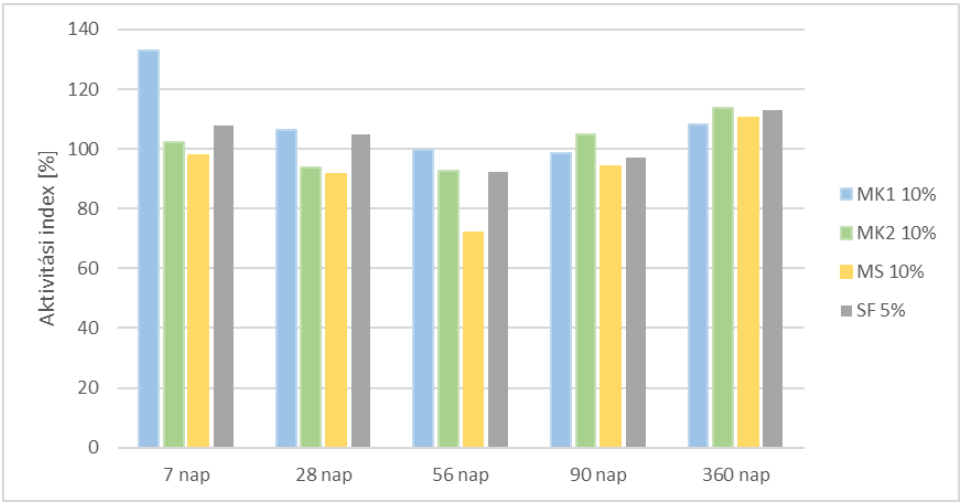


25. ábra: A habarcs keverékek nyomószilárdságának alakulása az R0 habarcshoz viszonyítva, 2 éves korban

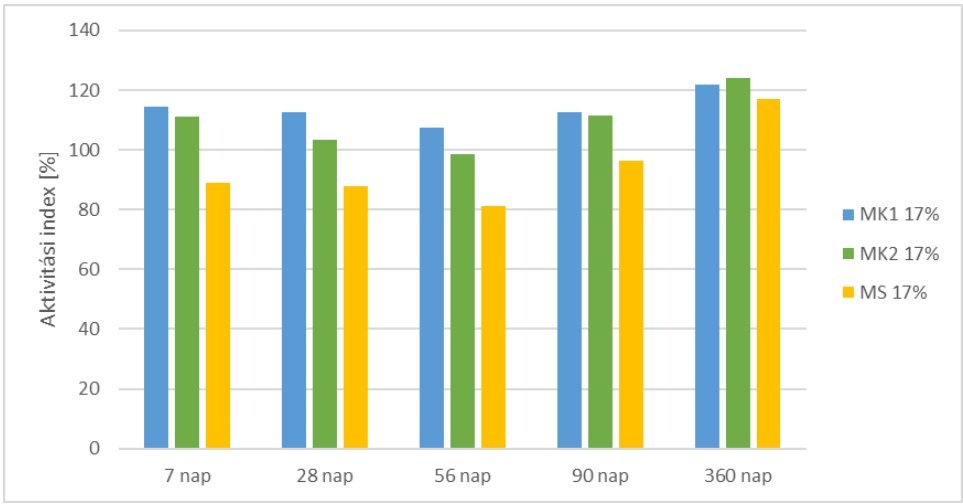
A szilárdsági adatok felhasználásával meghatároztuk az alkalmazott helyettesítésre vonatkozóan a cement kiegészítőanyagok aktivitási indexeit. Az aktivitási indexszel jellemezhető a puccolános anyagok hidraulikus aktivitása. Ez az aktivitási mutató a cementnek cement kiegészítőanyaggal való helyettesíthetőségének mértékét fejezi ki. Az EN 450 (2000) szabvány alapján az aktivitási index 75 m% referenciacementtel és 25 m% cementkiegészítő anyaggal készített szabványos habarcshasáb nyomószilárdságának viszonya (%-ban) a tisztán referenciacementtel készített, ugyanolyan korban vizsgált szabványos habarcshasáb nyomószilárdságához. Mivel a kutatás nem tartalmazott ilyen összetételű mintákat, ezért az aktivitási indexeket az általunk alkalmazott 5, 10 vagy 17 m% cementkiegészítő anyagot tartalmazó keverékek nyomószilárdságából határoztuk meg (**5. táblázat**). A vizsgálati eredményeket diagrammokon mutatjuk be (**26-27. ábra**). A különböző korokban a vizsgált kötőanyag keverékeken meghatározott aktivitási indexek értékeiben egy minimum figyelhető meg 56 és 90 napos kor körül.

5. táblázat A habarcskeverékek aktivitási indexei az 5% (SF), 10 vagy 17 m% (MK1, MK2 vagy MS) cementkiegészítő anyagot tartalmazó keverékek nyomószilárdságából határoztuk

Aktivitási index [%]						
Minta jele	SCM	7 nap	28 nap	56 nap	90 nap	360 nap
111	MK1 10%	133	106	100	99	108
112	MK1 17%	115	113	108	113	122
121	MK2 10%	102	94	93	105	114
122	MK2 17%	111	103	98	112	124
132	MS 10%	98	92	72	94	110
133	MS 17%	89	88	81	96	117
113	SF 5%	108	105	92	97	113

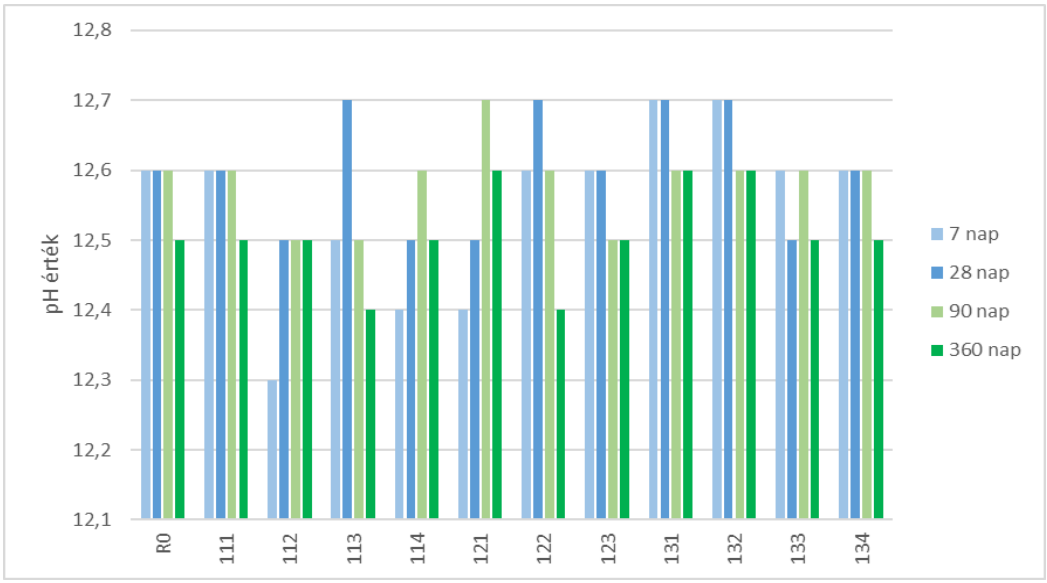


26. ábra: A 10% helyettesítési arányú (MK1 és MK2), valamint az 5% helyettesítési arányú (SF) habarcs keverékek aktivitási indexei, %



27. ábra: A 17% helyettesítési arányú (MK1, MK2 és MS) habarcs keverékek aktivitási indexei, %

Vizsgáltuk a kiegészítő anyagok hatását a különböző korú habarcsok pH értékére. Az egyes keverékek pH értéke a **28. ábrán** látható. Az értékek a hidratáció előrehaladtával nem változtak jelentősen, sem a puccolános reakció, sem az esetlegesen bekövetkezett karbonátosodás nem csökkentette figyelemre méltóan a pH értéket. Megállapíthatjuk, hogy minden egyes minta pH értéke 12,3 és 12,7 közé esik, ami megfelel a betontól vasbeton szerkezetekben elvárható lúgosságnak.

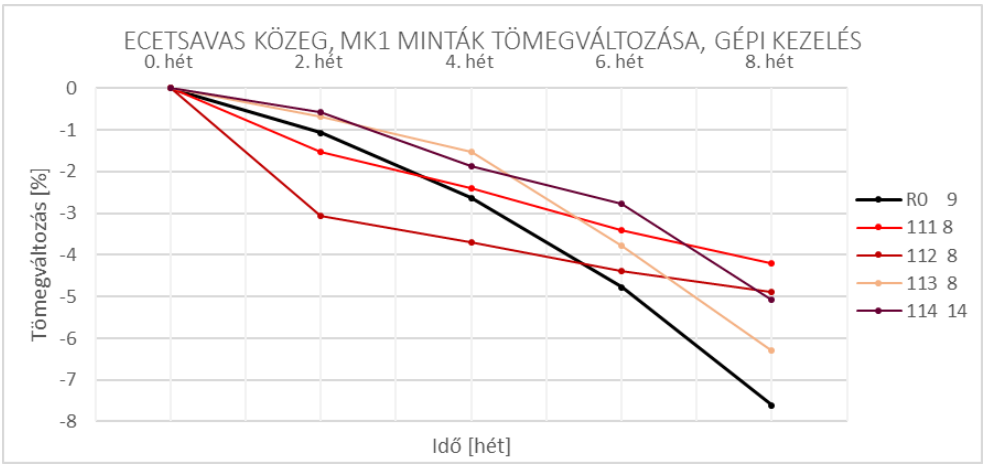


28. ábra: A kiegészítő anyag tartalmú habarcsok pH értékei különböző korokban

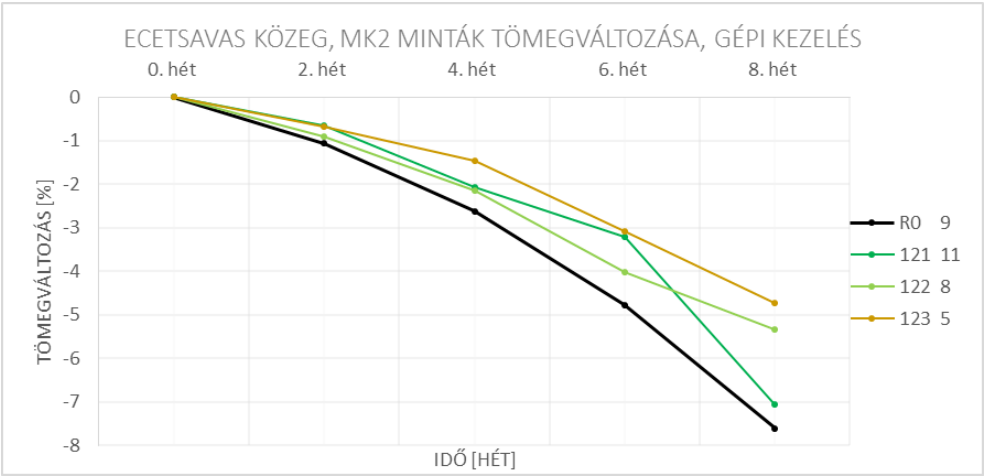
Egy éves korú habarcs minták kémiai ellenállóképességének vizsgálata savas közegben, gépi módszerrel

A habarcs hasábokon egy éves korukban dinamikus (gépi) savkorróziós vizsgálatokat végeztünk, amely 8 héten át tartott. A projekt során általunk fejlesztett vizsgálóberendezéseket elsősorban beton vizsgálatára alakítottuk ki, amelyhez a 150 mm-es élhosszúságú kockákból vágunk ki próbatesteket. Ezért a habarcs próbatestek méretével is ehhez kellett alkalmazkodnunk (40x40x150 mm). A 28 napos kortól eltérő (pl. 56 napos, egy éves) korban elvégzett kísérletekkel ki lehet küszöbölni azt a feltételezett hatást, hogy a 28 napos korban megkezdett kísérletek esetében a puccolános reakció még nem fejti ki pozitív hatását, amely többek között az ellenálló képesség növekedésében is megnyilvánulhat.

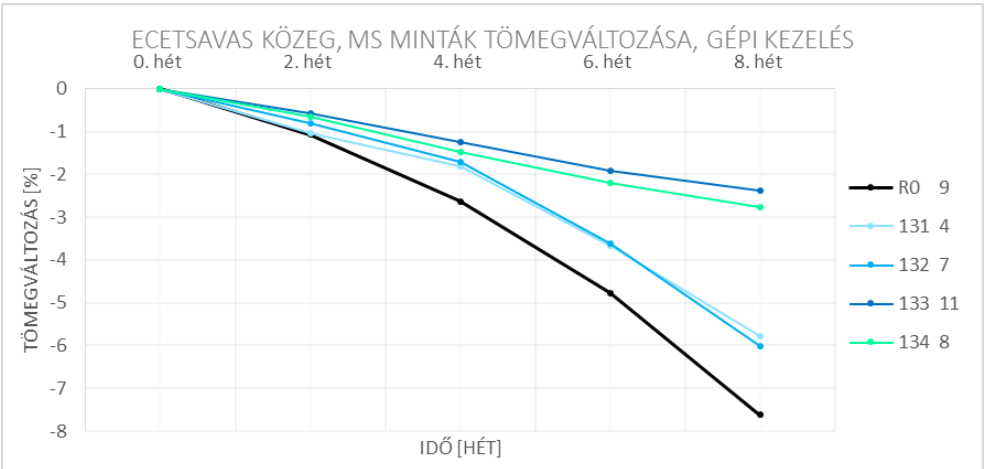
A **29-31. ábrán** látható az ecetsavas közeggel végzett gépi vizsgálat során bekövetkező változás, amelyet a különböző kiegészítő anyagokkal készült habarcsok heti gyakorisággal mért tömegváltozásával értékeltünk. Meg lehet figyelni a leromlási folyamatok eltérő dinamikáját, pl. a 111 és 112 a kezelés első két hetében mutatott intenzívebb leromlást, míg a 113, 123, 131, 132 és R0 minták leromlása a 4. hét után gyorsul fel. A 121 minta savkorróziója a 6. héten gyorsult fel. A 133 és 134 minták leromlási folyamata egyenletes sebességgel és a többi mintáétól jelentősen lassabban ment végbe. Az ecetsavas kezelést követően a próbatestek tömege 2-10% tömegveszteséget mutatott. A legnagyobb veszteséget a referencia minta mutatta, így ehhez a mintához képest minden további keverék jobban teljesített. A legnagyobb tömegváltozást a 121, a legkisebbet a 133 keverék szenvedte el (**32. ábra**).



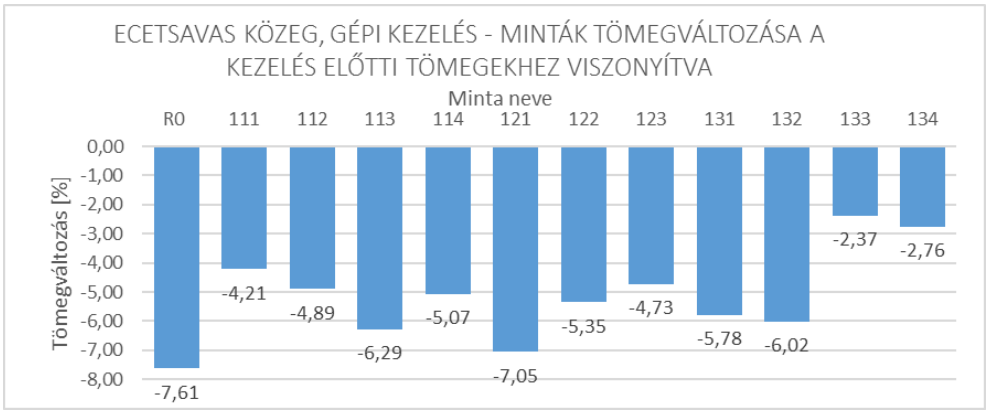
29. ábra: Az MK1 kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása ecetsavas közegben



30. ábra: Az MK2 kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása ecetsavas közegben

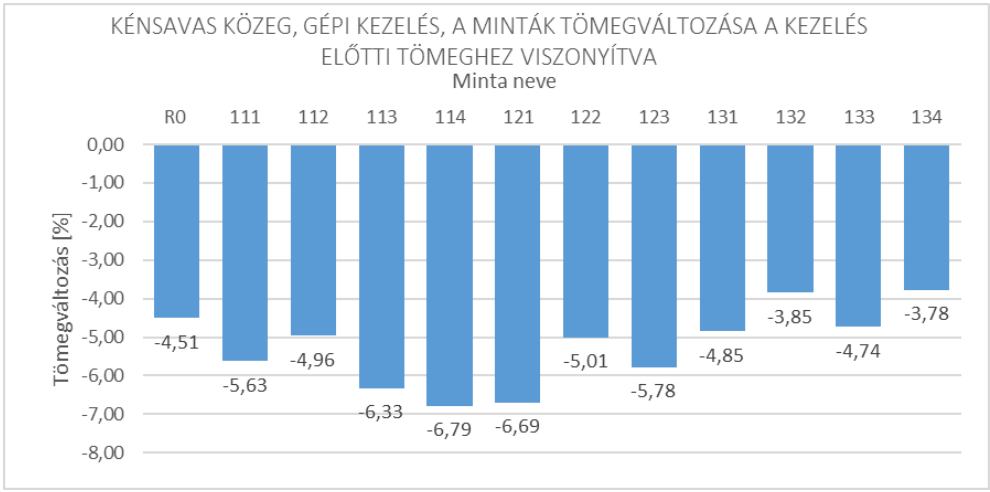


31. ábra: Az MK2 kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása ecetsavas közegben

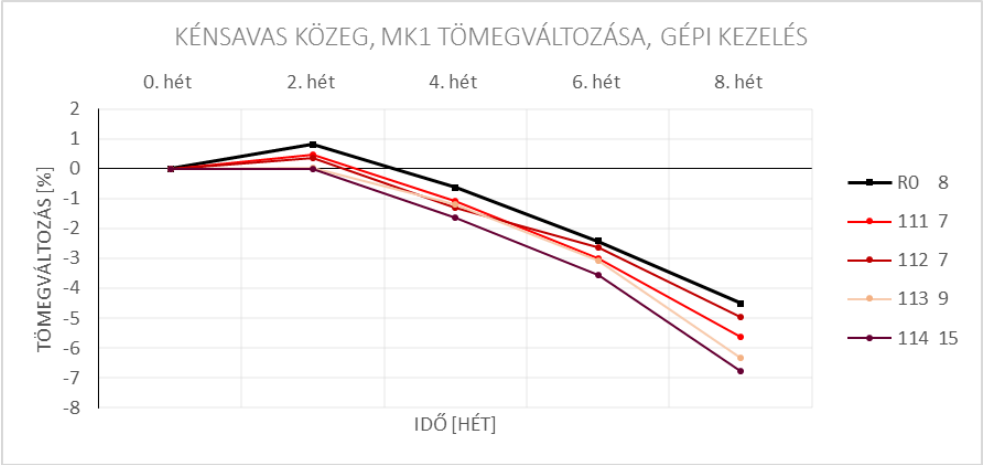


32. ábra: A kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása az egyes keverékek ecetsavas kezelést megelőző tömegeihez viszonyítva

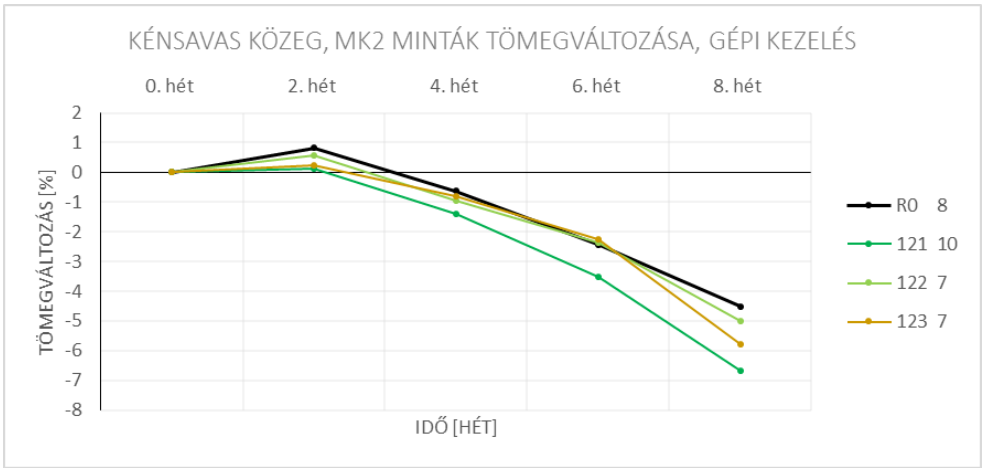
A kénsavas közegben az első két hétben többnyire tömegnövekedés volt tapasztalható. A legnagyobb tömegnövekedést az R0 referencia mintán mértük a 2. hétig, majd ezt követően az R0 leromlási folyamata közel lineáris módon zajlik. Az MK1 tartalmú minták mindegyike jelentősebb tömegveszteséget szenvedett, mint az R0. Az MK2 kisebb, 10%-os adagolása (121) esetén a kénsavas kezelés a 8. hét végére lényegesen nagyobb tömegveszteséget okozott, mint az R0 esetében. Az MK2 további (122: 17% MK2 és 123: 7% MK2/3% SF) keverékei a 6. hét után mutatnak romlást az R0-val összehasonlítva. Az MS keverékek közül a 132 (10% MS) és a 134 (7% MS/3% SF) ellenálló képessége jobb, mint az összes többi vizsgált habarcsé (**33-36. ábrák**).



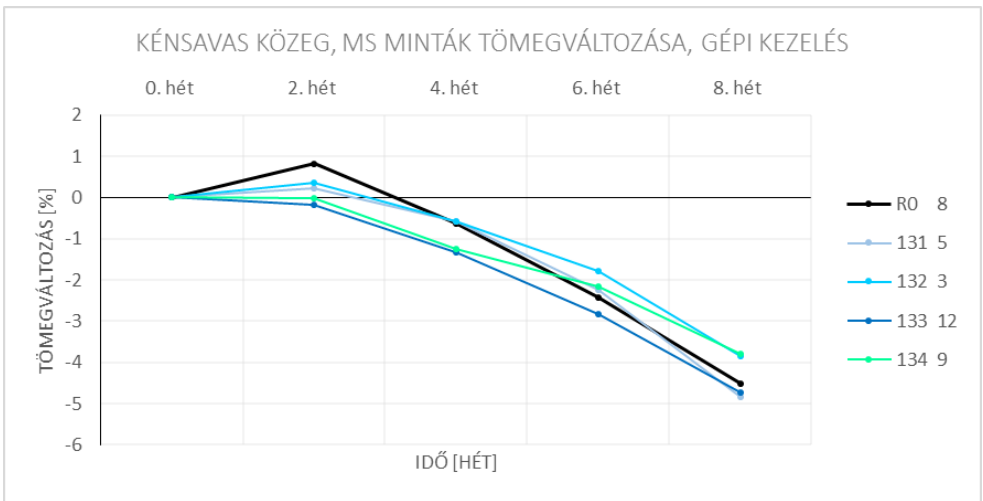
33. ábra: A kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása az egyes keverékek kénsavas kezelést megelőző tömegeihez viszonyítva



34. ábra: Az MK1 kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása kénsavas közegben

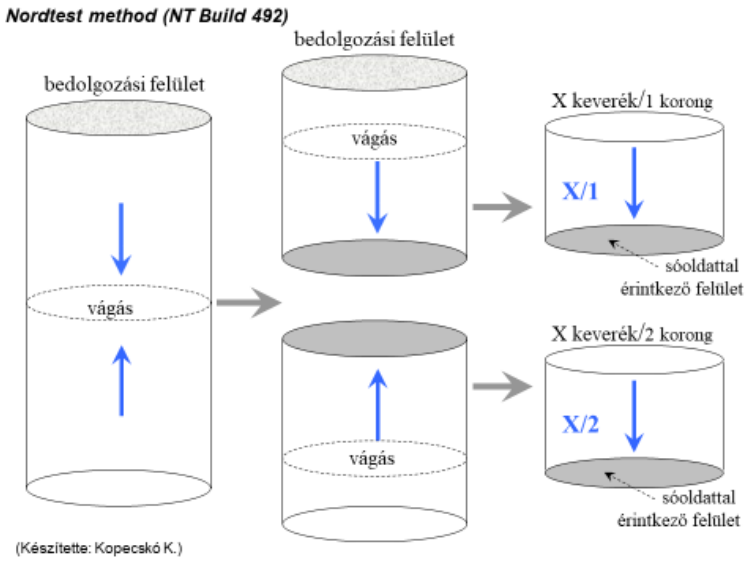


35. ábra: Az MK2 kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása kénsavas közegben

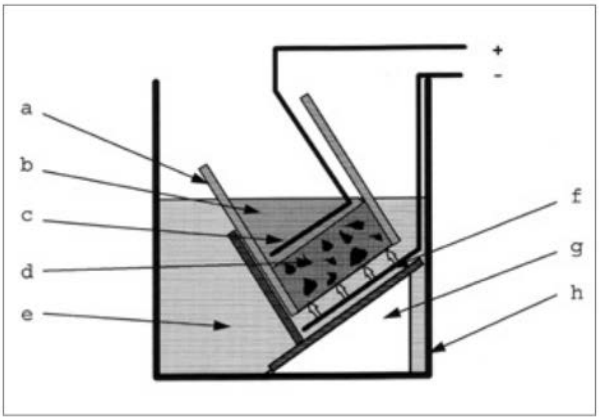


36. ábra: Az MS kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása kénsavas közegben

A vizsgált habarcsok további fontos jellemzőjét is vizsgáltuk, a kloridion migrációs koefficienseket (non-steady-state migration coefficient, D_{nssm}). A vasbeton szerkezetekben a kémiai ellenállóképesség vizsgálatán túl szükség van a a kloridionok behatolásával szembeni ellenállóképesség ismeretére is, amely a környezeti körülmények mellett befolyásolhatja a betonfedés vastagságát. A vizsgálatokat gyors kloridion migrációs módszerrel, a NordTest NT Build 492 végeztük el. A vizsgálatokhoz Ø100/200-as hengereket készítettünk, amelyekből vágással alakítottunk ki két, Ø100/50-es próbatestet (korongot). A vizsgálatokat vákuum alatt mészvízzel telített próbatesteken végeztük el, különböző korokban (**37-38. ábra**).



37. ábra: A vizsgálati minták előkészítése az NT Build 492 szerinti migrációs vizsgálathoz



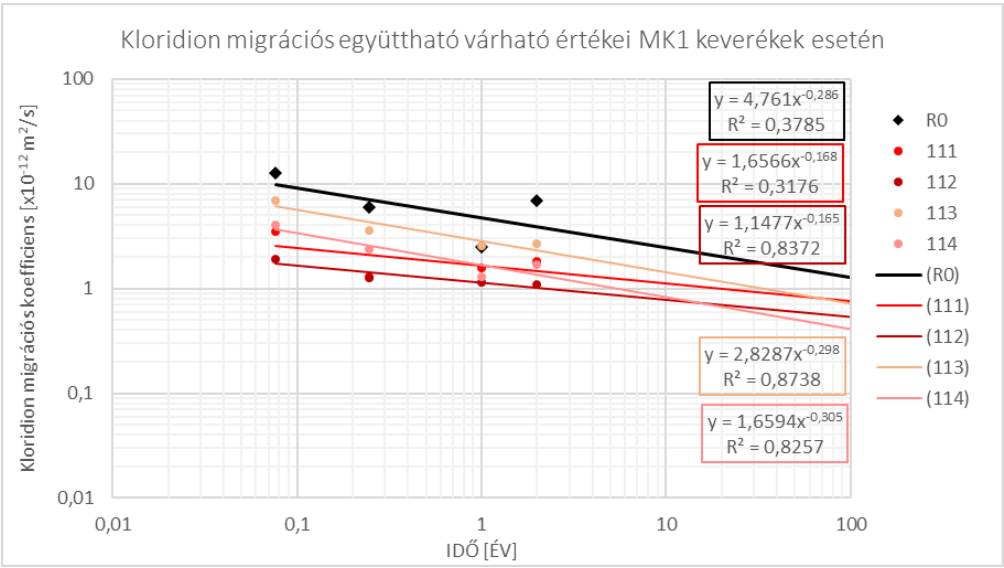
38. ábra: Az NT Build 492 szerinti migrációs cella
(Jelmagyarázat: a- gumigyűrű, b - anódos oldat, c - anód, d - próbatest, e - katódos oldat, f - katód, g - műanyag támaszték, h - műanyag konténer) (Kopecskó, 2008)

A cementkötésű anyagokban mérhető kloridion migrációs együttható idővel csökken (javul), mivel az idő múlásával az anyag tömörebb lesz. Ezt a csökkenést a különböző korokban mért vizsgálatokkal nyomon lehet követni. A vizsgálati eredményeket kettős logaritmikus diagrammon ábrázolva, a mérési eredményekre illesztett trendvonal függvénye az együttható időbeni változását szemlélteti. A függvényhez az egyenletét és az R^2 korrelációs tényező adjuk meg.

Függvény alakja: $y = a \cdot x^{-\alpha}$

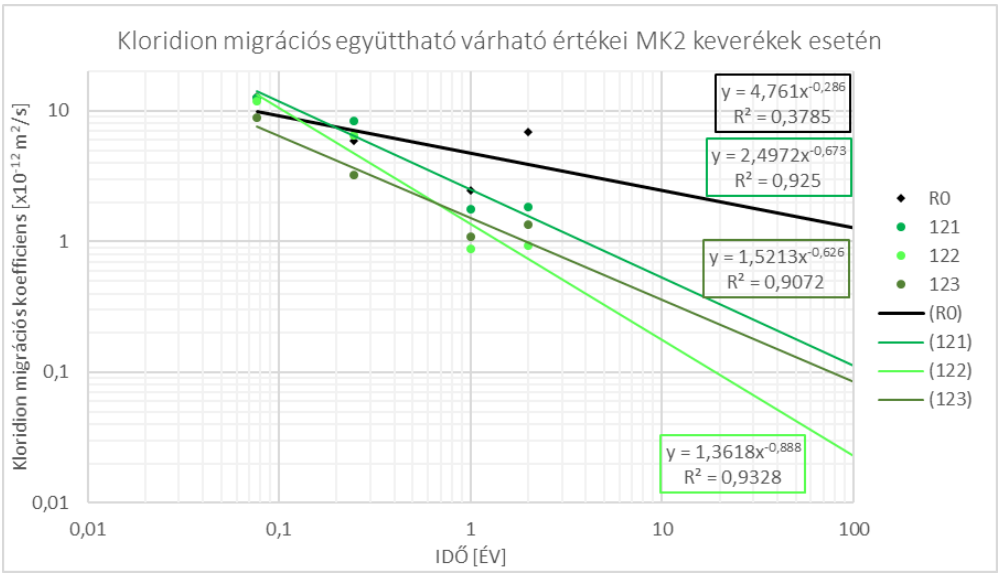
ahol a kitevőben szereplő α maga a korténeyezőt. A korténeyező segít az adott betonfedés mellett a valós élettartam meghatározásában, vagy adott élettartam mellett az elégséges betonfedés megállapításában.

Az MK1 típusú keverékeknek a kezdeti kloridmigrációs együtthatója a referenciáéhoz képest kisebb, azonban a későbbi korok migrációs tényezője kevésbé csökken, így a kettős logaritmikus diagramra ráillesztett egyenes meredeksége kisebb lesz, mint a referencia esetében (**39. ábra**). Ez a korténeyező értékét befolyásolja. A mikroszilika (SF) tartalmú keverék (113) és a MK1-et és SF-et kombináltan tartalmazó keverék (114) esetében az egyenes meredekebb, tehát a korténeyező kedvezőbb.



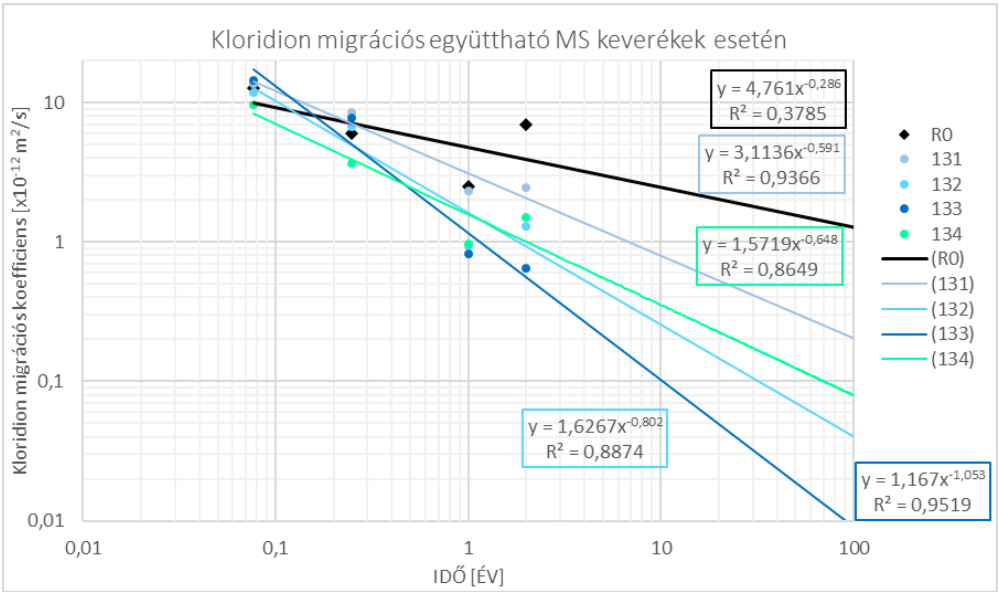
39. ábra: Kloridion migrációs együttható várható értékei az MK1 és SF keverékek esetén, az illesztett egyenesek egyenletével (log-log diagramon szemléltetve)

Az MK2 típusú keverékek esetében a kezdeti koefficiens értéke a referenciához közeli értékeket adott, azonban a későbbi, 1, illetve 2 éves korban mért adatok alapján a koefficiens sokkal kisebb (kedvezőbb), mint a referencia minta esetében. A nagyobb MK2 adagolás nagyobb mértékben csökkenti idővel a koefficienst. A nagyobb a meredeksséggel az előrevetített kloridmigrációs együtthatók jóval kisebbek, ami a nagyobb mértékű kloridion behatolással szembeni ellenállóképességet jelzi (**40. ábra**).



40. ábra: Kloridion migrációs együttható várható értékei az MK2 és SF keverékek esetén, az illesztett egyenesek egyenletével (log-log diagramon szemléltetve)

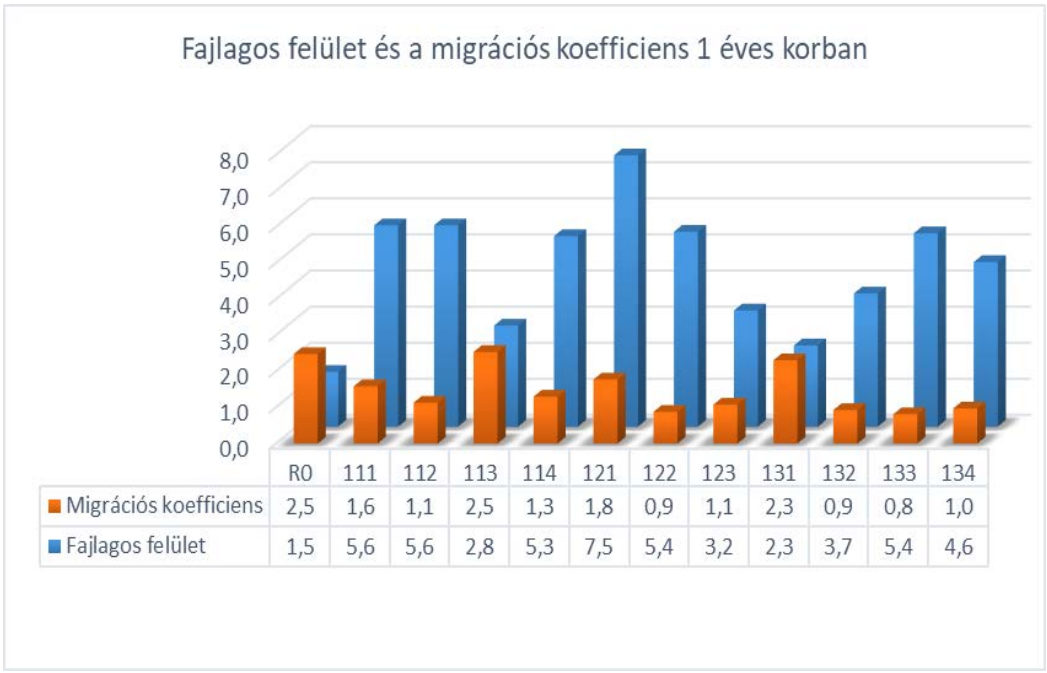
A kloridion migrációs koefficiensek értékeiben a legnagyobb változást az MS (szűrt kőszénpernye) típusú keverékeknél figyelhetünk meg. Ez esetben a kezdeti koefficiens értékeink nagyobbak voltak, mint a referencia minta értéke, ugyanis a puccolános reakció lassabban indul be, mint a metakaolin esetében, azonban a későbbi vizsgálatok során drasztikusabb csökkenés következik be. A legjobb eredményt a 133-as keveréknél kaptuk a számozott minták közül. Ez a minta tartalmazza a kőszénpernyét a legnagyobb adagolásban, 17 m%-ot (**41. ábra**).



41. ábra: Kloridion migrációs együttható várható értékei az MS és SF keverékek esetén, az illesztett egyenesek egyenletével (log-log diagramon szemléltetve)

Meg kell jegyeznünk, hogy a mért értékek alapján a 133 habarcs esetében a számított kortényező egy egésznél nagyobb érték lett, ami a valóságban nem lehetséges, az egyenes illesztésének javításához további, későbbi korban elvégzett vizsgálatra lesz szükség (**41. ábra**).

Az egy éves korú habarcs keverékeken meghatározott migrációs koefficiensek és a higanyos porozimetriával meghatározott fajlagos felülete közötti összefüggések a **42. ábrán** figyelhetők meg.



	R0	111	112	113	114	121	122	123	131	132	133	134
Migrációs koefficiens	2,5	1,6	1,1	2,5	1,3	1,8	0,9	1,1	2,3	0,9	0,8	1,0
Fajlagos felület	1,5	5,6	5,6	2,8	5,3	7,5	5,4	3,2	2,3	3,7	5,4	4,6

42. ábra: A habarcs keverékeken meghatározott migrációs koefficiensek és a higanyos porozimetriával meghatározott fajlagos felülete közötti összefüggések, 1 éves korban mérve

A **39., 40. és 41. ábrákon** a log-log ábrázolásban a vizsgálati eredményekre illesztett egyenesek egyenletében a negatív kitevő, az ún. „ageing factor" (magyarul kor- vagy öregedési tényező, α). A kortényezők alapján sorba rendezhettük a vizsgált kötőanyag keverékekből készült habarcsok kloridionok behatolásával szembeni ellenállóképességét (**6. táblázat**). Minél nagyobb a kortényező értéke, annál nagyobb mértékű javulását (csökkenését) várhatjuk a migrációs (vagy diffúziós vizsgálat esetén a diffúziós) koefficiensnek. Vizsgálati eredményeink feldolgozása a JWG tartóssági szakvéleményében (2014) megfogalmazott módszerrel összhangban van (**43. ábra**).

Vizsgálati eredményeink is alátámasztják azt a megállapítást, hogy a kloridion migrációs vagy diffúziós koefficiensek idővel javuló tendenciát mutatnak, azaz csökkennek. A csökkenés mértéke alapján lehet az egyes kötőanyag keverékeket a várható környezeti körülményeknek megfelelően kiválasztani a vasbeton szerkezetek tervezett élettartamához.

6. táblázat: A vizsgált habarcs próbatestek az α korténeyezők alapján sorba rendezve

Név	CEM I 42,5 N-SR0, m%	MK1, m%	MK2, m%	SF, m%	MS, m%	Kortényező (α)
133	83%	0	0	0	**17%**	-1,053
122	83%	0	**17%**	0	0	-0,888
132	90%	0	0	0	**10%**	-0,802
121	90%	0	**10%**	0	0	-0,673
134	90%	0	0	**3%**	**7%**	-0,648
123	90%	0	**7%**	**3%**	0	-0,626
131	95%	0	0	0	**5%**	-0,591
114	90%	**7%**	0	**3%**	0	-0,305
113	95%	0	0	**5%**	0	-0,298
R0	100%	0	0	0	0	-0,286
111	90%	**10%**	0	0	0	-0,168
112	83%	**17%**	0	0	0	-0,165

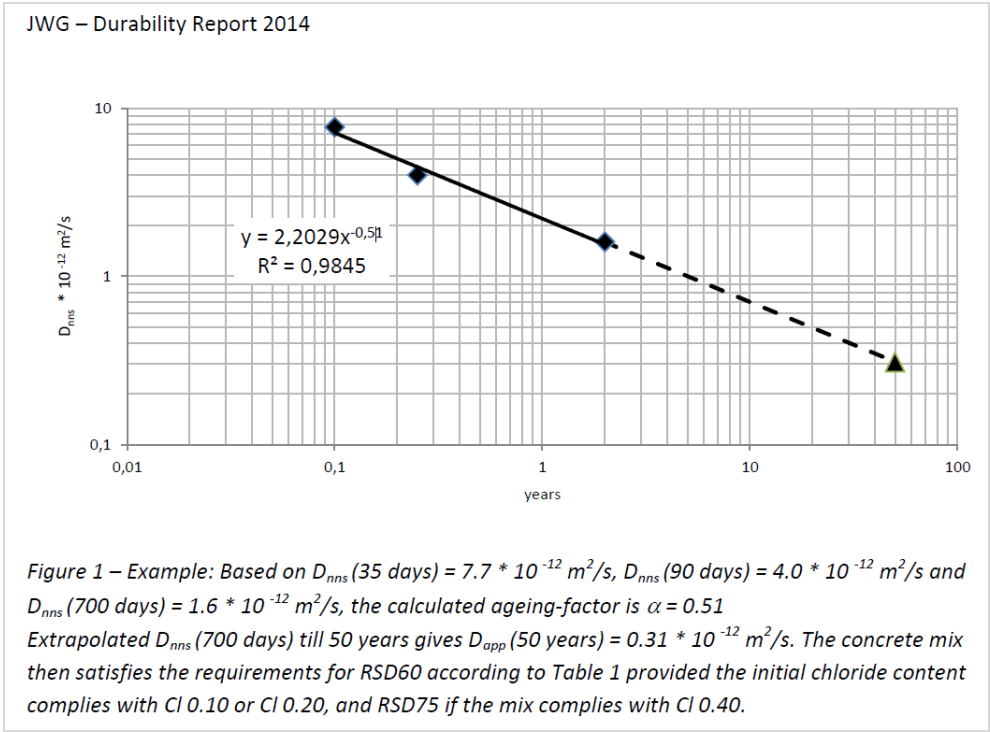


*Figure 1 – Example: Based on D_{nns} (35 days) = 7.7 * 10 $^{-12}$ m^2/s, D_{nns} (90 days) = 4.0 * 10 $^{-12}$ m^2/s and D_{nns} (700 days) = 1.6 * 10 $^{-12}$ m^2/s, the calculated ageing-factor is α = 0.51*
*Extrapolated D_{nns} (700 days) till 50 years gives D_{app} (50 years) = 0.31 * 10 $^{-12}$ m^2/s. The concrete mix then satisfies the requirements for RSD60 according to Table 1 provided the initial chloride content complies with Cl 0.10 or Cl 0.20, and RSD75 if the mix complies with Cl 0.40.*

43. ábra: A kortényező meghatározása a JWG tartósági szakvéleményében (2014) megfogalmazott módszer alapján

4. ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓK

Jelen cikk bevezetőjében összefoglaltuk az NVKP_16-1-2016-0019 projekt „Kémiai ellenállóképességi" altémájához kapcsolódó feladatainkat: a feladatok rendkívül szerteágazóak voltak, felölelték a kötőanyag- és habarcs kísérleteken át a betonok ellenállóképességének vizsgálatát, a közbeszerzést, valamint a beszerzett nagyműszerekkel már a kutatási projekt során is hasznosítható vizsgálatokat. Ezen kívül teljesítettük azt a vállalásunkat is, amelyben kétfajta savkorróziós berendezés kifejlesztését és tesztelését valósítottuk meg. A projekt alkalmat adott arra is, hogy összehasonlíthassuk a 12 hetes, hagyományosnak tekinthető kézi (statikus) és a 6 hetes új, gépi (dinamikus) módszer hatásait, eredményességét, mind habarcs-, mind beton mintákon. A gépi módszerekre kidolgozott és a projekt során már alkalmazott vizsgálati eljárásokból két nyilvántartásba vetetett know-how született.

A cikk további fő fejezeteiben áttekintettük a projekt első mérföldkövében elkezdett kötőanyag ellenállóképességi kutatásunkat. A feladat során a különböző cementkiegészítő anyagok hosszútávú hatását vizsgáltuk a beton teljesítőképességére nézve, cementpép, illetve habarcs próbatesteken. 12-féle kötőanyag keveréken vizsgáltuk a cement kiegészítőanyagok hatását, ecet-, kén- és tejsavas közegben. A kísérletekhez 30 mm élhosszúságú cementpép kockákat, valamint az egyes vizsgálatoknak megfelelő méretű habarcs próbatesteket gyártottunk. Egyes vizsgálatokat, pl. a kloridion migrációs koefficiens meghatározását, két éves korban is elvégeztünk, ezzel lehetőségünk nyílt az egyes kiegészítőanyagok korteny ezőre kifejtett hatását is tanulmányozni. A kémiai ellenállóképességet kétféle módon vizsgáltuk: (i) cementpép kockákon statikus (kézi) módszerrel, amelyet 28 napos korban kezdtünk el, majd az ellenőrző vizsgálatokat 90 napos korban végeztük; majd (ii) habarcs hasábokon egy éves korban, dinamikus (forgó gépi) módszerrel. A forgó rendszerű berendezést az első mérföldkő során fejlesztettük, így a gépi vizsgálatokat az egy éves korú habarcs hasábokon tudtuk elvégezni.

Legfontosabb megállapításaink - pépkockák:

- A kötőanyag pépkockákon elvégzett savkorróziós kísérletek megállapításai a tömegváltozás alapján: az abrázió mentes ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, R0, 121, 123, 122, 131, 134; abráziós kezeléssel az ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, 122, 131, 133, 121, R0, 123.
- A kötőanyag pépkockákon elvégzett savkorróziós kísérletek megállapításai a térfogatváltozás alapján: az abrázió mentes ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, 121, 122, 123, R0, 131; abráziós kezeléssel az ecetsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 114, 122, 121, 132, 123. Mindent összevetve a 114, 121, 122 és 123 (SF, MK2 és MK2/SF) keverékek bizonyultak az ecetsavas környezetben leginkább ellenállónak.
- A kötőanyag pépkockákon elvégzett savkorróziós kísérletek megállapításai a tömegváltozás alapján: az abrázió mentes kénsavas környezetben a legkisebb tömegváltozást szenvedő keverékek (csökkenő sorrendben): 111, 134, 112, 133, R0, 121; abráziós kezeléssel a kénsavas környezetben a legellenállóbb keverékek (csökkenő sorrendben): 134, 133, 111, 121, 114, 131.
- A kötőanyag pépkockákon elvégzett kénsavas savkorróziós kísérletek megállapításai a térfogatváltozás alapján: az abrázió mentes kénsavas környezetben az R0, 114, 123, 121, 122 keverékek szenvedték el a legkisebb térfogatváltozást; míg az abráziós

eljárással a kénsavas környezetben az R0, 133, 114, 121, 134 keverékek szenvedték el a legkisebb térfogatváltozást.

- Ha összehasonlítjuk az ecetsav és a kénsav hatását (abrázió nélkül), észre vehető, hogy a kétféle metakaolin eltérő módon viselkedik a két különböző közegben: az MK1 tömegváltozása kisebb mértékű a kénsavas közegben, mint az MK2 keverékeké; ugyanakkor ecetsavban pedig az MK2 keverékek tömegváltozása kisebb mértékű.
- A tejsavas kezelés esetében az abrázió nélküli/abráziós kezelés hatásában nem mutatkozott jelentős különbség. Tejsavban tárolt kockák esetében a legkisebb változások a referencia (R0) és a 121, 122, valamint 123 (mindhárom MK2 tartalmú) keverék esetében tapasztaltuk, mind abráziós, mind abrázió nélküli kezeléssel. A legnagyobb tömegveszteség az MS szűrt kőszénpernyét 10 m%-ban tartalmazó keverék esetében mutatkozott.
- A tejsavas közeg minden kötőanyag keverék esetében térfogatcsökkenést okozott. A legkisebb térfogatváltozást (-0,02 %) az R0 referencia minta esetében mértük, az abráziós hatás nélküli kezeléssel. A legnagyobb térfogatcsökkenés a 133-as keverék esetében volt tapasztalható (17% MS).

Legfontosabb megállapításaink - habarcsok:

- A kapilláris vízfelvétel és a látszólagos porozitás értékei alapján megfigyeltük, hogy minden egyes kiegészítő anyag esetében akkor értük el a legkedvezőbb esetet, ha a kiegészítőanyagot szilikapor szuszpenzióval együttesen alkalmaztuk, tehát úgynevezett hármas – ternary – kötőanyag keverékkel készült a minta (114, 123, 134 keverékek). Elmondhatjuk, hogy a kapilláris vízfelvétel esetében, míg az MK1 esetén a nagyobb mennyiségű kiegészítő anyag alkalmazása (112) pozitív hatású (tehát csökkenti a kapilláris vízfelvételt), addig az MK2-nél és MS-nél 10%-os adagolása a kedvezőbb (121, 132).
- Az egy éves kori porozimetriai jellemzők alapján megállapítottuk, hogy a cement kiegészítő anyagok adagolása a habarcsok esetében is többnyire finomítja a leggyakoribb pórusátmérő tartományt (111, 112, 113, 114, 121 és 132), a tartománynak mind a felső, mind az alsó értékét kisebb pórusátmérők irányába tolja. Ugyanakkor az összporozitás nem minden kiegészítőanyag fajta és adagolás mellett csökken, pl. a 111, 122, 133 és 134 esetében az összporozitás értéke az R0 referencia esetében mértnél nagyobb érték.
- Két éves korra a legtöbb minta nyomószilárdsága nagyobb, mint az R0 referencia habarcs nyomószilárdsága. Kivételt képeznek a 111-es és egyes MS (szűrt kőszénpernye) kiegészítőanyag tartalmú próbatestek; ezek esetében ~4-10%-kal kisebb eredményeket kaptunk.
- A különböző korokban a vizsgált kötőanyag keverékeken meghatározott aktivitási indexek értékeiben egy minimum figyelhető meg 56 és 90 napos kor körül.
- A különböző korú és kiegészítőanyag tartalmú habarcsok pH értékei a hidratáció előrehaladtával nem változtak jelentősen, sem a puccolános reakció, sem az esetlegesen bekövetkezett karbonátosodás nem csökkentette figyelemre méltóan. Megállapíthatjuk, hogy minden egyes minta pH értéke 12,3 és 12,7 közé esik, ami megfelel a betontól vasbeton szerkezetekben elvárható lúgosságnak.
- Az ecetsavas közeggel végzett gépi vizsgálat során bekövetkező változások alapján meg lehet figyelni a leromlási folyamatok eltérő dinamikáját, pl. a 111 és 112 a kezelés első két hetében mutatott intenzívebb leromlást, míg a 113, 123, 131, 132 és R0 minták leromlása a 4. hét után gyorsul fel. A 121 minta savkorróziója a 6. héten gyorsult fel. A 133 és 134 minták leromlási folyamata egyenletes sebességgel és a

többi mintáétól jelentősen lassabban ment végbe. Az ecetsavas kezelést követően a próbatestek tömege 2-10% tömegveszteséget mutatott. A legnagyobb tömegveszteséget a referencia minta mutatta, így ehhez a mintához képest minden további keverék jobban teljesített. A legnagyobb tömegváltozást a 121, a legkisebbet a 133 keverék szenvedte el.

- A kénsavas közegben az első két hétben többnyire tömegnövekedés volt tapasztalható. A legnagyobb tömegnövekedést az R0 referencia mintán mértük a 2. hétig, majd ezt követően az R0 leromlási folyamata közel lineáris módon zajlik. Az MK1 tartalmú minták mindegyike jelentősebb tömegveszteséget szenvedett, mint az R0. Az MK2 kisebb, 10%-os adagolása (121) esetén a kénsavas kezelés a 8. hét végére lényegesen nagyobb tömegveszteséget okozott, mint az R0 esetében mért. Az MK2 további (122: 17% MK2 és 123: 7% MK2/3% SF) keverékei a 6. hét után mutatnak romlást az R0 habarccsal összehasonlítva. Az MS keverékek közül a 132 (10% MS) és a 134 (7% MS/3% SF) ellenállóképessége jobb, mint az összes többi vizsgált habarcsé.
- Vizsgáltuk a kötőanyag keverékek kloridionok behatolásával szembeni ellenállóképességét is. A két éves korig elvégzett kloridion migrációs vizsgálatok eredményei alapján megállapítottuk a vizsgált kiegészítőanyag típusok és adagolások hatását a kortényezőre. A kortényező nagysága alapján, és azáltal a kloridion migrációs tényező javításában legjobbnak mutatkozó keverékek sorrendje: 17% MS (133) > 17% MK2 (122) > 10% MS (132) > 10% MK2 (121) > 7% MS/3% SF (123).

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

6. HIVATKOZÁSOK

Balázs L. Gy. – Kausay T. – Kopecskó K. – Nemes R. – Nehme S. G. – Lublóy É. – Józsa Zs. – Arany P. (2019), „Betonok oldódásos korróziója – szakirodalmi áttekintés”, DOI: 10.32969/VB.2019.3.1

European Standard EN 450, Fly ash for concrete—definitions, specifications and conformity criteria, CEN, Brussels, 2000.

Kopecskó K. (2008), „Kloridion megkötőképesség és klorid migráció a betonban”, Betonszerkezetek tartóssága, Konferencia kiadvány, Budapest, pp. 141-164.

Mlinárik, L. Kopecskó, K. (2014), „Effects of long-term acidic treatment on the hydration mechanism of metakaolin (MK) containing cement pastes”, In: J, Bastien; N., Rouleau; M., Fiset; M., Thomassin (szerk.), Proceedings of The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Quebec City, Kanada : Université Laval, pp. 79-84. 6 p.

Mlinárik, L. Kopecskó, K. (2016), „Influence of severe acidic circumstances on hydration and microstructure of cementitious materials”, In: Koichi, Maekawa; Akio, Kasuga; Jun, Yamazaki (szerk.), Proceedings of 11th fib International PHD Symposium in Civil Engineering, Tokió, Japán: University of Tokyo, p. 927, pp. 261-268

Mlinárik, L. Kopecskó, K. (2017), „The influence of combined application of two SCMs on the corrosion and acid attack durability of mortars”, PERIODICA POLYTECHNICA-CIVIL ENGINEERING 61 : 2 pp. 313-321. , 9 p.

NT BUILD 492 Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments (1999).

AZ ÉMI NONPROFIT KFT. RÖVID BEMUTATKOZÁSA

Sándor Viktória
ÉMI Nonprofit Kft.
2000 Szentendre, Dózsa Gy. út 26.

Tóth Péter László
ÉMI Nonprofit Kft.
2000 Szentendre, Dózsa Gy. út 26.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk röviden bemutatja az ÉMI Nonprofit Kft. fő tevékenységeit és szolgáltatásait

1. AZ ÉMI TEVÉKENYSÉGEI

Az ÉMI Építésügyi Minőségellenőrző Innovációs Nonprofit Kft. jogelődjét 1963-ban hozták létre. Ma az ÉMI Magyarország legnagyobb épület- és építőanyag-ipari minőségellenőrző innovációs intézménye, a hazai építésügy meghatározó szereplője és szakmai szellemi központja. Tevékenységét országos lefedettséggel látja el, a több mint fél évszázad alatt felhalmozódott tapasztalatát, tudását és hozzáértését hazai és nemzetközi szinten egyaránt bizonyítja.
A 100%-ban állami tulajdonú ÉMI működését a mai napig meghatározzák létrehozásának alapvető céljai, ugyanakkor meg kell felelnie a jelen kor elvárásainak, kihívásainak is. Az építőipar egy folyamatosan változó, megújuló, állandó próbatételekkel, feladatokkal teli szektor. Növekvő tendenciáját nem csak követni kell, de előrelátó és felkészült működést is szükséges folytatni.
Az ÉMI tevékenysége ennek megfelelően ma igen sokrétű, amely többek között az alábbiakat fogalja magába:

- mérnöki szakértések, szaktanácsadás;
- műszaki ellenőrzések, tanúsítások;
- komplex épületdiagnosztikai szolgáltatások;
- kiemelt beruházások teljeskörű lebonyolítása, műszaki- és tervellenőrzése;
- megfelelőség-értékelés;
- laboratóriumi vizsgálatok, ellenőrzések az ország legnagyobb komplex építőipari vizsgálólaboratóriumában;
- kutatás-fejlesztés és innováció;
- nukleáris létesítmények szakértése;
- építésfelügyeleti munka támogatása;
- piacorientált hazai és nemzetközi projektek, kutatások;
- műszaki szabályozás, irányelv-alkotás;
- iparági együttműködések támogatása;
- építéságazat fejlesztését célzó programok;
- szakmai és lakossági szintű szemléletformálás az energiahatékonyság, fenntarthatóság iránt;

- szakmai rendezvények szervezése;
- oktatás, képzés.

A magyar építőságazat meghatározó és független szereplőjeként az ÉMI támogatni kívánja tevékenységével a minőségi építési termékek, és építmények jelenlétét. Ez a törekvés olyan épített környezet létrejöttét támogatja, amely időtálló, fenntartható és élhető. Éppen ezért, az ÉMI célkitűzése, hogy saját tevékenysége mellett ezt a szemléletet, a minőség iránti elkötelezettséget is közvetítse a tervezői, kivitelezői szakmában és az állami épületgazdák, valamint a lakosság körében egyaránt. A Társaság filozófiája: minden tevékenységének mozgatórugója a minőség és az innováció iránti elkötelezettség.

Magyarország legnagyobb komplex vizsgáló bázisaként, az országos laboratórium hálózat segítségével több mint 1000 féle – közülük 700 akkreditált – vizsgálatot képes az ÉMI teljesíteni a hazai és nemzetközi piacon.
A közel hatvan évnyi, az építőipar különböző területein (tartószerkezetek, épületfizika, tűzvédelem, vegyészet, épületgépészet, mechanika) felhalmozódott szakértői tapasztalatának, valamint képzett, hozzáértő szakembereinek köszönhetően kiemelkedő színvonalú szolgáltatásokat képes nyújtani.
Az épület- és építőanyag-ipari jóváhagyás, a helyszíni és laboratóriumi vizsgálatok, ellenőrzések, a műszaki szakértői munka és az innovációs kutatás a mindennapi munka része a Társaságnál. Független szakmai intézményként, korszerű diagnosztikai műszerezettséggel garantálja, hogy a vizsgálat építőipari termékek és technológiák a mindenkori hazai, valamint európai uniós jogszabályi és minőségbiztosítási követelménynek megfelelnek, így megbízóik is magas minőséget nyújthatnak termékeikkel, szolgáltatásaikkal.

2. LABORATÓRIUMI SZOLGÁLTÁSOK

Az ÉMI 2018-ban megújult Központi Anyag- és Szerkezetvizsgáló Laboratóriuma, az országban egyedülálló Tűzvédelmi Vizsgáló Laboratóriuma, valamint a Kelet-magyarországi (Debrecen, Miskolc), illetve Nyugat-magyarországi Anyagvizsgáló Kirendeltsége (Győr) alkalmas az építőiparhoz kapcsolódó, széleskörű szakági laboratóriumi és helyszíni ellenőrzést igénylő feladatok elvégzésére. Kirendeltségei, valamint mobil laboratóriumai révén labor-tevékenységét országos lefedettséggel tudja ellátni.

3. MEGFELELŐSÉGÉRTÉKELÉS

A Megfelelőségértékelő Központ az építési termékek forgalmazásához, beépítéséhez szükséges műszaki értékelési és tanúsítási tevékenységeket végzi. Ennek keretében, jogszabályi kijelölés birtokában nemzeti, illetve európai műszaki értékeléseket ad ki, 34 termékkörben a harmonizált termékszabvánnyal nem lefedett termékekre, valamint akkreditált tanúsító szervezetként teljesítményállandósági és üzemi gyártásellenőrzés megfelelőségi tanúsítványokat bocsát ki több száz harmonizált termékszabvány, illetve egyedi műszaki előírások alapján.
A műszaki értékelések során meghatározza az adott építési termék felhasználási területe szempontjából releváns termékjellemzőit és laboratóriumi vizsgálati eredmények, számítások, illetve egyéb lehetséges módszerek alapján megadja azok teljesítményértékeit. Ez irányú tevékenysége az építési termékek szinte teljes vertikumát lefedi.
A teljesítményigazolási eljárásai során az építési termékek gyártóüzemeit, illetve a gyártóüzemek gyártásellenőrzési rendszerét ellenőrzi, tanúsítja, illetve rendszeres

időközönként felülvizsgálja. Munkája számos hazai, európai, sőt távol- és közel keleti építőanyaggyártó üzemre kiterjed.
A fentieken kívül Alkalmazástechnikai Bizonyítványokat állít ki építőipari segédanyagok, illetve segédszerkezetek alkalmazási feltételei vonatkozásában.

4. NAGYBERUHÁZÁSOK TELJESKÖRŰ LEBONYOLÍTÁSA, MŰSZAKI- ÉS TERVELLENŐRZÉSE

Az ÉMI Nonprofit Kft. az 51/2016. (III.17.) kormányrendelet értelmében egyes állami építési beruházások tekintetében az építési beruházás generál tervezésének teljes körű, minden szakágra kiterjedő és folyamatos tervellenőri, építési műszaki ellenőri és lebonyolítói tevékenységét látja el, támogatva a megrendelőt a kiemelt beruházások magas színvonalú megvalósításában.



A lebonyolítás során az ÉMI elsődleges feladata a beruházás szereplőinek teljeskörű koordinálása, a tervező, kivitelező munkájának a szerződéses keretek között tartása, a hatósági szereplők megfelelő időben történő bevonása, az ütemtervek betartásának ellenőrzése, az építési tevékenység hatályos szabványoknak és jogszabályoknak való megfeleltetése, az anyagok beépíthetőségének kontrollálása. A műszaki ellenőri teendők során a Társaság nagy tapasztalattal bíró mérnökei az építés helyszínén többek között ellenőrzik, hogy az építménybe a tervező által a kivitelezési dokumentációban meghatározott, legalább az elvárt műszaki teljesítményű építési termékek, szakszerűen kerüljenek beépítésre. Eltakarás előtt ellenőrzik a szerkezetépítési elemeket, esetleges hibákra, hiányosságokra hívják fel a figyelmet, illetve engedélyt adnak a továbbhaladásra, melyeket az építési naplóban folyamatosan rögzítenek. Az ÉMI az ilyen típusú beruházásoknál komplex szolgáltatást biztosít: a szükséges kontroll laboratóriumi vizsgálatokat, segédmérnöki szakértéseket saját egységeiben képes elvégezni, valamint a beépítendő építési anyagok teljesítménynyilatkozatait is gyorsan ellenőrizni tudja az ÉMI Megfelelőségértékelési Központ háttértámogatásával. Mindezeken túl az ÉMI kutatás-fejlesztési területe is be tud kapcsolódni a folyamatokba ezeknél a beruházásoknál, többek között épületinformációs modellezéssel, egyedi műszaki fejlesztésekkel, vagy a nemzetközi jó gyakorlatok

meghonosításával. A beruházó számára ezáltal egy mindenre kiterjedő, komplex szolgáltatást tud az ÉMI nyújtani, ami támogatja a minőségi végeredményt.
A kiemelt állami beruházások magas színvonalon történő megvalósításának igényeihez igazodva a Beruházástámogató Központ folyamatosan fejlődik, kiemelkedő hozzáértéssel és gyakorlattal rendelkező szakemberek látják el az ÉMI ezen tevékenységéhez kapcsolódó feladatokat, valamint további piaci megbízásokat is teljesítenek.
Az ÉMI által támogatott, kiemelt állami beruházás többek között a Károlyi-Csekonics Palota, a Teleki-Tisza Kastély Nagykovácsiban; a Nemzeti Hauszmann Program keretében megújuló Lovarda, Főőrség és Stöckl-lépcső; a Karmelita kolostor; vagy a Várkert Bazár.



1. ábra: Az ÉMI lebonyolítása mellett megvalósult Károlyi-Csekonics Palota részlete

5. NUKLEÁRIS TEVÉKENYSÉG

Az ÉMI közel 40 éve tevékenykedik nukleáris területen. A Paksi Atomerőmű építésének kezdeti szakaszától kezdve aktív szerepet vállalt a beruházásban. Eredményesen tevékenykedett a kutatási és műszaki szabályozási, a MEO szintű minőségellenőrzési, a szuperellenőri és építésfelügyeleti ellenőrzési területen.
Az ÉMI-ben önálló egység foglalkozik a nukleáris szakterülettel, melynek főbb tevékenységei:

- építészeti szuperellenőrzési feladatok elvégzése (az erőmű építési időszakától kezdve 2011-ig);
- a Paksi Atomerőmű elkészült blokkjai Öregedéskezelési Programjának (ÖKP) kidolgozásában való részvétel, ill. ennek keretében 2000. évtől a nukleáris létesítmények - üzemi főépületek, segédépületek, az üzemeltetést biztosító vízkivételi

mű és dízelgépházak, továbbá egyéb építmények (pl. meteorológiai torony) – ciklikus, meghatározott ütemezés szerinti építészeti állapotvizsgálata;
- az atomerőmű üzembe helyezése óta részvétel annak biztonságnövelő beruházásaihoz kapcsolódó és egyéb építészeti átalakítások tervezésének és kivitelezésének szuperellenőrzésében, illetve a 247/2011.(XI.25.) Korm. rendelet hatályba lépését követően a független műszaki szakértői feladatok ellátásában;
- fokozatosan erősödő részvétel PAKSII építési jogszabály és projekt előkészítésében;
- Nukleáris Független Műszaki Szakértői Klaszter létrehozása, mely nukleáris területen az összes érintett szakterület (nukleáris biztonság, építőipar, technológiai gépészet és villamosság, irányítástechnika) képviseletét hivatott egy közös szakmai képviseletbe tömöríteni.
- paksi laboratórium fejlesztésének megindítása.

Az ÉMI Nonprofit Kft. az atomerőmű, az OAH és a MVM ERBE részéről is rendelkezik érvényes beszállítói minősítéssel, melyek társaságunkat a meglévő és tervezett atomerőművi blokkokkal összefüggő építmények, épületszerkezetek (nukleáris létesítmények) létesítésével, átalakításával, javításával és karbantartásával összefüggő minősítő vizsgálatok, szakértői és független műszaki szakértői tevékenységek végzésére jogosítja.
Az ÉMI Építésügyi Minőségellenőrző Innovációs Nonprofit Kft. - az eddigi tevékenységei alapján - elnyerte a Paksi Atomerőmű 2018. évi Kiemelt Szállítója címét.

6. KUTATÁS-FEJLESZTÉS-INNOVÁCIÓ ÉS NEMZETKÖZI JELENLÉT

Megalakulása óta az ÉMI a kutatás-fejlesztés-innováció, valamint a nemzetközi tevékenységek területén is kimagasló fejlődésen ment keresztül. Hazai piacorientált kutatás-fejlesztési tevékenysége mellett együttműködik számos nemzetközi társszervezettel, vesz részt közösen nemzetközi K+F pályázati felhívásokban.
Kutatást támogató és saját kutatás-fejlesztési tevékenységét kifejezetten a piacorientált kutatás-fejlesztésre összpontosítja, különös tekintettel a felsőoktatási intézményekkel, társintézetekkel és ipari partnerekkel együttműködésben megvalósuló projektekre. Az ÉMI emellett részt vesz az építészeti kultúra fejlesztését szolgáló országos kutatási, műszaki fejlesztési, valamint az oktatási képzési programokban. A Miskolci Egyetemmel kötött stratégiai megállapodása közvetlen eredménye az Egyetemmel, a BorsodChem-mel és a BOSCH-sal közösen megvalósuló projekt, amely hosszú távra megalapoz egy, az építőipari fejlesztéseket magas szinten támogató kutatás-fejlesztési központot.
A Társaság tagja számos európai és nemzetközi szervezetnek, mint az EOTA, az Egolf, az ENBRI, a WFTAO, a CIB, az ECTP, vagy az UEAtc. Nemzetközi társintézetek együttműködő vagy konzorciumi partnereként nemzetközi szinten is részt vesz kutatás-fejlesztési projektekben. Jelenleg futó nemzetközi projektjeiben is az építőságazat innovációs képességét javító, illetve a fenntartható épített környezet megteremtését célzó tevékenységeket lát el. Tagként vagy konzorciumvezetőként tevékenykedik többek között kisméretű hő- és elektromos tárolórendszer fejlesztésében, nZEB és BIM témájú tananyagok fejlesztésében, és további nagyléptékű képzési és tanúsítási rendszerek kidolgozásában az építőipar szereplői számára. Olyan projektben is megmutatja szakmai hozzáértését, mely a kulturális örökség vezérelte rehabilitációt célozza, vagy a lakosság számára nyújt tájékoztatást az építőanyagok környezeti hatásairól. Aktívan részt vesz az energiahatékonyabb, egészségesebb és fenntarthatóbb okos városok kialakítását, valamint a több országon átívelő épületenergetikai szabályozás összefogását és megismertetését célul kitűző projektekben.

A több mint 3,5 milliárd forintos uniós támogatással megvalósuló projektjeivel az ÉMI hozzájárul a hazai épített környezet és építőságazat fejlesztéséhez. Ezek a projektek és az ÉMI

aktív szerepvállalása a nemzetközi szervezetek munkájában lehetőséget kínálnak a magyarországi építőágazati kutatás-fejlesztési és innovációs képesség nemzetközi szintű bemutatására illetve erősítésére, a hazai érdekek érvényesítésére és hasonló profilú intézmények tevékenységének, eredményeinek megismerésére.

Aktívan közreműködik továbbá az Európai Unió nemzetközi együttműködési programjaiban, különös tekintettel a Horizont 2020 kutatási keretprogramjára. A Covenant of Mayors (Polgármesterek Szövetsége - CoM) szervezettel kötött megállapodás alapján „Country Coordinator", azaz Nemzeti Koordinátorként támogatja a helyi és megyei önkormányzatokat a fenntartható településfejlesztés stratégiaalkotási folyamataiban.

Építőipari ágazati támogatáskezelés

Az ÉMI látja el a 2018 év során meghirdetett, „Az építőipari ágazat technológiai korszerűsítésére, hatékonyságának növelésére irányuló" támogatási programok (2018/1. és 2018/2. Támogatási program) teljeskörű kezelői feladatait.

A Támogatási program célkitűzése az építőipari ágazat fenntartható, modern technológián alapuló fejlődésének támogatása annak érdekében, hogy a hazai ipar meghatározó ágazata eleget tudjon tenni a növekvő volumenű megrendelői igényeknek.

Az innováció társadalmasítása

Az ÉMI Nonprofit Kft. az innováció társadalmasítása terén is kilépett a nemzetközi színtérre. 2017-ben sikeres pályázatával elnyerte az USA-ból 2002-ben indult Solar Decathlon nemzetközi, egyetemek között zajló házépítő innovációs versenysorozat 2019-es „Európa-bajnokságának" rendezési jogát. A kezdeményezés központi célja a napenergia, a megújuló energiák és az innovatív technológiák alkalmazásával összefüggő építészeti megoldások népszerűsítése az egyetemi csapatok által felépített pályaműveken keresztül.

Az ÉMI szentendrei székhelyén megvalósult Solar Decathlon Europe 2019 (SDE19) megmérettetésen 10 csapat indult a világ minden tájáról: Magyarország mellett Franciaország, Spanyolország, Hollandia, Románia, Thaiföld, Belgium egyetemistái képviselték intézményüket, országukat. A megmérettetésen **több mint 400 egyetemista épített fel alig két hét alatt nulla energiás lakóházakat**. A magyar rendezésű verseny fő témája szerint a résztvevők a meglévő épületállomány felújítását helyezték fókuszba.



2. ábra: A Solar Decathlon Europe 2019 verseny során felépült épületek

Az SDE19 nemzetközi egyetemi innovációs házépítő verseny keretében felépült 10 mintaházat Szentendrén az ÉMI Tudományos és Technológiai Ipari Parkjában – az előző versenyektől eltérően – a két hetes versenyt követően még két hónapon át, egy meghosszabbított kiállítás keretében tekinthették meg az érdeklődők. A nulla energiás lakóépületekre több mint **15 ezer ember** volt kíváncsi a verseny és a meghosszabbított kiállítás alatt.

Híd szerep az építéságazat szereplői között

Az SDE19 versenyt szervező ÉMI szemléletformáló és széles körű tájékoztató célját szem előtt tartva, az esemény során felépült házak közül több a területén maradt és megújult formában, újabb házakkal bővülve ÉMI Nemzeti Mintaházparkként várja majd látogatóit. A nulla energiás házak mérései tovább folytatódnak, melyek adatai innovatív építőipari vállalkozásoknak, beruházóknak és kivitelezőknek, lakossági építtetőknek, a szakpolitikának, egyetemeknek, valamint kutatóknak egyaránt hasznos információ- és tudásanyagként szolgálhatnak. A látogatóközpontban emellett egy kiállító csarnokban az építőipar szereplői bemutathatják innovatív termékeiket. A Mintaházpark központi helyszíne lehet olyan folyamatoknak, amelyeknek célja az innovációs és piaci termékek, épületek valós környezetben történő elemzése, tesztelése, bemutatása a megvalósításban érdekelt felek és végfelhasználók bevonásával. Az ÉMI Nemzeti Mintaházpark egyik kiemelt célja, hogy közvetítőként működjön majd a szereplők között a közös, fenntartható jövőt támogató értékteremtés érdekében.

7. MŰSZAKI SZABÁLYOZÁS, ÉPÍTÉSÜGYI IRÁNYELVEK

Az ÉMI meghatározó szerepet vállal az építésügyi szabályozás terén is. Szakértői véleményezik az építésügyi jogszabályokat és javaslatot tesznek azok fejlesztésére. Számos területen kapcsolódik be a szabványosítással kapcsolatos munkákba is: több más mellett

közreműködik új építőipari szabványok kidolgozásában, a meglévő szabványok felülvizsgálatában. Figyelemmel kíséri a hazai és más európai szabványok változásait, és szakmai tapasztalatát kamatoztatva részt vesz az építésügyi szabványokat bemutató kiadványok szerkesztésében.
Az ÉMI irányítja az Építésügyi Műszaki Irányelvek készítésének folyamatát, melynek keretében többek között javaslatokat tesz irányelv-témakörökre a szakmagyakorlók meglátásai alapján, elkészíti, vagy véleményezi a felkért szakértők által írt irányelveket és javaslatokat fogalmaz meg azok tartalmára, biztosítja a szakmai nyilvánosságot és a nyílt véleményezési lehetőséget, illetve az elkészült irányelvek nyilvánosságát. Az ÉMI a 2017 májusában megalakult Építésügyi Műszaki Szabályozási Bizottság titkári feladatait is ellátja.

8. SZAKMAI RENDEZVÉNYEK, KÉPZÉSEK, TUDÁSMEGOSZTÁS

AZ ÉMI a hazai építésügyi szakma széles spektrumát átfogó tudástőkével és a minőség-ellenőrzési tevékenység során felhalmozott egyedülálló tapasztalattal rendelkezik. Ezt a tőkét szakmai kompetencia-fejlesztésben, illetve főként szakmai rendezvények során kamatoztatja.
A magyarországi építőipari szakmai szervezetekkel, a felsőoktatási kutatóközpontokkal, szakképző centrumokkal és a releváns nemzetközi szervezetekkel együttműködve közös projektek keretében biztosítja a tudásmegosztást nagy tapasztalattal és hozzáértéssel rendelkező munkatársai által.
Képzési szolgáltatásaival választ ad a szektor-specifikus humán erőforrás fejlesztési igényekre. Mindezeken túl szakmai konferenciákat szervez építésügyi szakemberek részére, illetve lakossági tájékoztató portálon foglalja össze a lényeges tudnivalókat családi házas építkezésekhez.



3. ábra: Szakmai előadás a Construma kiállításon

9. HIVATKOZÁSOK

36/2016. (XII. 29.) MvM rendelet az Építésügyi Műszaki Szabályozási Bizottságról
6/2019. (IV. 4.) ITM rendelet az Építésügyi Műszaki Szabályozási Bizottságról
51/2016. (III.17.) kormányrendelet az állami tulajdonban levő ÉMI Nonprofit Kft. állami építési beruházásokkal kapcsolatos egyes műszaki szolgáltatási feladatok elvégzésére vonatkozó kijelöléséről

AZ *NVKP_16-1-2016-0019* JELŰ KUTATÁSI PROJEKTBEN KÉSZÍTETT ÉPÍTÉSÜGYI MŰSZAKI IRÁNYELV TERVEZETEK RÖVID BEMUTATÁSA

Tóth Péter László
ÉMI Nonprofit Kft.
2000 Szentendre, Dózsa Gy. út 26.

Dr. Lublóy Éva
BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék
1111 Műegyetem rakpart 1-3

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a "Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című, NVKP_16-1-2016-0019 jelű kutatási projektben készített építésügyi műszaki irányelv tervezetét mutatja be.

1. AZ ÉPÍTÉSÜGYI MŰSZAKI IRÁNYELVEK *(Papp I., Tóth P., 2020)*

Az építőipar fejlődésével, az építésügyi szabályozási környezet folyamatos változásával az építési és üzemeltetési folyamat szereplőire egyre összetettebb feladatok hárulnak. Ezen feladatok ellátása - a szakmai ismereteken túl - nagymértékben a hatályos jogszabályok, valamint a szabványok alkalmazásán alapul. Az építőipari szakma működési gyakorlata indokolttá teszi, hogy a szabványok mellett olyan útmutatók, műszaki irányelvek szülessenek, melyek az építőipar egyes szakterületein az ismétlődő műszaki gazdasági feladatok célszerű megoldásait rögzítik.

Az irányelvek egy sajátos típusa, az építésügyi műszaki irányelv a közelmúltban került bevezetésre. Az Építési törvény fogalommeghatározása szerint *az építésügyi műszaki irányelv jogszabály vagy európai, vagy nemzeti szabvány által nem vagy nem teljeskörűen szabályozott területen, ismételt vagy folyamatos alkalmazás céljára, széles körű szakmai összefogással és állami felügyelet mellett létrehozott, magyar nyelven kiadott, mindenki számára hozzáférhető építésügyi műszaki előírás (1997. évi LXXVIII törvény)*

Az építési műszaki irányelv a műszaki előírások hierarchiájában a nemzeti szabványok alatt, a Tűzvédelmi Műszaki Irányelvvel (TvMI) és az Útügyi Műszaki Előírással (UME) egy szinten helyezkedik el. A szövetségek, gyártók vagy kamarák által készített irányelvekkel szemben az építésügyi műszaki irányelvek alkalmazását - a tűzvédelmi műszaki irányelvekhez hasonlóan - jogszabályi (törvényi) hivatkozások is támogatják.

A szabványokhoz és más irányelvekhez hasonlóan az Építésügyi Műszaki Irányelvek alkalmazása is önkéntes. Abban az esetben, ha az irányelv alkalmazása műszaki tartalmú jogszabályban, szerződésben, illetve azok mellékleteiben kerül rögzítésre, kötelező érvényű is lehet.

Az irányelvek elfogadásáért felelős Építésügyi Műszaki Szabályozási Bizottság (ÉMSZB) 2017-ban jött létre, tagjai a Magyar Építész Kamara, Magyar Mérnöki Kamara, Magyar Szabványügyi Testület, Építési Vállalkozók Országos Szakszövetsége, ÉMI Nonprofit Kft, Lechner Nonprofit Kft., Országos Atomenergetikai Hivatal, Belügyminisztérium Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság, valamint az építési szabályozásért és építéshatósági ügyekért a felelős miniszter által vezetett minisztérium által delegált személyek. A Bizottság elnöke az építésgazdaságért felelős miniszter által kinevezett szakmai vezető *(6/2019. (IV. 4.) ITM rendelet, 2019. 36/2016. (XII. 29.) MvM rendelet).*

A szakmai szervezetek által javasolt, az ÉMSZB által is fontosnak ítélt témakörökben a delegált illetve felkért szakemberekből álló munkacsoportok készítenek irányelv tervezeteket. A lehető legnagyobb mértékű szakmai és társadalmi elfogadottság érdekében az előkészített tervezetek az ÉMI honlapján több csoportban közzétételre kerülnek. A véleményezés során nagyszámú észrevétel érkezik a tervezetek többsége kapcsán. A több körben véleményezett és javított anyagokról az ÉMSZB tagjai szavaznak.

Az ÉMSZB által már jóváhagyott irányelvek szövege szabadon hozzáférhető az ÉMI Nonprofit Kft. honlapján. A közzétett irányelvek listája havonta frissül.

2. MŰSZAKI IRÁNYELV TERVEZETEK KÉSZÍTÉSE AZ NVKP PROJEKTBEN

A „Fokozott ellenálló képességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című, NVKP_16-1-2016-0019 jelű kutatási projektben a BME, az ÉMI, az SW-Umwelttechnik Magyarország, a CRH Magyarország Kft., az MC Bauchemie Kft. vettek rész konzorciumi tagként. A projekt az előregyártott vasbeton építési termékek magasabb ellenállású változatainak kifejlesztését célozta meg, a korrózióállóság, fagyállóság és tűzállóság vonatkozásában. A projekt 2017 márciusában indult és 2020. október 30-án zárult. A projektben tett vállalások között szerepelt két műszaki irányelv tervezet készítése is, az elvégzett kutatás és vizsgálatok tapasztalatai alapján. Mindkét elkészült irányelv tervezet a magasabb tűzállósági teljesítményű vasbeton termékekhez kapcsolódik.

Jelen cikk az *MSZ EN 14992:2007+A1:2013* harmonizált európai termékszabvány alapján gyártott feszített homlokzati elemekkel és az *MSZ EN 13224:2012* harmonizált európai termékszabvány szerint gyártott bordás vasbeton födémpanelekkel kapcsolatos irányelvek tervezeteit mutatja be.

3. A MŰSZAKI IRÁNYELV TERVEZETEK RÖVID BEMUTATÁSA

3.1. Az irányelv tervezetek célja

Az irányelv tervezetek elsősorban bizonyos kötöttségekkel rendelkező nagyszilárdságú vasbeton elemek tűzállósági teljesítmény vizsgálatához nyújt támpontot. A kötöttségeknek nem megfelelő vasbeton termékekre nem terjed ki jelen tervezetérvényessége. Az irányelv tervezet a hazai építőipar azon szereplőinek tehát hatékony adhat segítséget, amelyek az irányelvben szereplő vagy ahhoz hasonló előregyártott vasbeton elemeket kívánnak fejleszteni és piacra vezetni.

Az előregyártott falpanel elemek és a bordás födémpanelek tényleges tűzállósági teljesítményének meghatározása elsősorban közvetlen vizsgálattal történhet meg, a számításos, ill. táblázatos eljárások a biztonság rovására tévedhetnek.

A laboratóriumi tűzállósági vizsgálatok a laboratórium adottságainak megfelelően, teljes méretű (nagyelemes) mintán történnek. A vasbeton elemek legyártása, mozgatása, laboratóriumi vizsgálata nagyon költséges és nehézkes, ezért a lehetőség szerint korlátozni kell az elvégzendő vizsgálatok számát. Az irányelv tervezet az NVKP projekt során elvégzett vizsgálatok tapasztalataira támaszkodva ad ajánlást az elemekre vonatkozó alapvető szerkesztési szabályokra is – így a „sikertelen" vizsgálatok (amikor a vizsgálattal kimutatott tűzállósági teljesítmény alacsonyabb a tervezettnél) száma kevesebb lehet.

3.2. A műszaki probléma

A tömör, robosztus vasbeton teherhordó építményszerkezetek tűzállósági teljesítménye általában számítással meghatározható. A számítási eljárás alapfeltevése, hogy a vasbeton keresztmetszet felmelegedése fokozatosan történik, a beton megtartja alakját így számíthatóvá válik az egész keresztmetszet felmelegedése és szilárdságcsökkenése is. Magasabb betonszilárdság esetén - külön beavatkozás nélkül - a betonfedés gyakran leválik (lerobban) a födém tűzzel érintett felületéről. A keresztmetszet méretének csökkenése mellett az acélbetétek felmelegedése ezáltal hirtelen módon és a vártnál jóval korábban történik meg. Ilyen esetben az az EUROCODE *(MSZ EN 1992-1-2)* szabványsorozat által megadott tűzállósági számítások nem használhatók, leginkább a közvetlen kemencés vizsgálatok alkalmasak a tényleges tűzállósági teljesítmény meghatározására.

A betonszerkezetek tűzállóságáról, a felmerülő problémákról és javítási lehetőségekről jelentős mennyiségű szakirodalom áll rendelkezésre. Szakmai egyetértés mutatkozik abban, hogy a magasabb betonszilárdsággal készülő vasbeton elemek (többek között pl. feszített falpanelek) tűzállósági teljesítményét javítani szükséges.

A tűzállósági teljesítmény javítására (tűzvédő burkolatok alkalmazásán túl) az alábbi lehetőségek mutatkoznak: a betonfedés növelése, szál erősítés (pl. műanyagszál), betonösszetétel módosítása, geometriai változtatások, kiegészítő vasalások alkalmazása (bajuszvasak, koszorúk).

3.3. A "*Feszített homlokzati elemek tűzvédelmi jellemzői*"című irányelv tervezet által javasolt kötöttségek és a várható tűzvédelmi jellemzők

3.3.1. Kötöttségek

Az irányelvben leírtak az *1. táblázatban* megadott kötöttségekkel jellemezhető termékekre vonatkoznak.

Beépítés: vízszintes elrendezés, de akár jelentős magassággal, tömör és ablakos elem is. A falpanelbelem gyártása öntött technológiával és tűvibrátoros tömörítéssel történhet, sablonfűtés alkalmazásával vagy anélkül, 12-16 órás érlelési idővel. A panelkéreg és a teherhordó panelrész kapcsolatát acél szerelvények biztosítják. Az ablakos panelek kávájában a hőszigetelő magot min 2 cm vastagságú beton vagy tűzvédő lap védelemmel látják el.

1. táblázat: A termék kötöttségei

Belső vasbeton kéreg	160 mm
Maghőszigetelés	120 mm XPS - EN - 13164 - T1 - CS(10\Y)300 - DS(TH) - DLT(2)5 - CC(2\1,5\50)130 - WD(V)3 - WL(T)0,7 - FTCD1 polisztirolhab hőszigetelés (ρ = 33-35 kg/m^3)
Külső vasbeton kéreg	70 mm külső vasbeton kéreg sima vagy bordázott felülettel
Betonfedés	30 mm
Betonacél:	B500B
Feszítőpászma:	Y 1770S7-9,6 (teherhordó rétegben)
	Y 1860 S7-12,5 (kéregben)
Beton:	C40/50-XC3-16-F3 (teherhordó rétegben)
	C40/50-XC4-XD1-XF1-16-F5 (kéregben)
műanyag szál adalékolás	min 1 kg/m^3
víz-cement tényező:	40%

3.3.2. Várható tűzvédelmi jellemzők

Az *1. táblázatban* szereplő kötöttségekkel megtervezett szerkezetek várható tűzállósági teljesítmény jellemzői a *2. táblázatban* találhatók. A közelítő számítást az MSZ EN 1992-1-2 szerint lehet elvégezni.

2. táblázat: A várható tűzvédelmi jellemzők

Tűzvédelmi osztály	B
Tűzállósági teljesítmény	EI 90 – EI 180 (tömör fal esetén)
Homlokzati tűzterjedési határérték	45 perc (nyílásos fal esetén, min. 1,30 m függőleges ablaktávolság mellett).

3.3.3. Az irányelv tervezet által javasolt tűzvédelmi vizsgálatok

3.3.3.1. Tűzállósági vizsgálatot megelőző betonösszetétel ellenőrzés

A valós léptékű kemencés vizsgálatokat megelőzően kiselemes vizsgálatokat javasolt végezni. A kiselemes vizsgálatok során 150*150*150 mm kockák és 70*70*250 mm-es hasábok hőterhelését végzik el. A hőterhelés javasolt maximális hőmérséklete 800 °C, a minimális hőmérséklete 500 °C. A próbatesteket egy felfűtött kemencébe kell helyezni egy órás időtartamra. A hőterhelés után a próbatesteket szemrevételezés alapján lehet értékelni. Ha a próbatestek tönkrementek (széthasadtak), akkor a nagyelemes kemencés vizsgálat előtt a betonösszetételt célszerű módosítani, ha nem akkor a nagyelemes vizsgálat elvégezhető.

Amennyiben a beton szilárdsági osztálya nem haladja meg a C30/37 szilárdsági osztályt, és hagyományos összetételű betonról van szó, a beton felület leválásának az esélye nagyon kicsi, tehát előzetes kiselemes vizsgálatra nincs szükség. Szintén elhagyható a kiselemes beton vizsgálat a C30/37 - C50/60 beton szilárdsági osztályok esetén, ha a betonkeverék minimum 1 kg/m^3 kisátmérőjű polipropilén szálat (mikroszálat) tartalmaz.

3.3.3.2. A tűzállósági teljesítmény közvetlen vizsgálata az MSZ EN 13501-2:2016 szabvány szerint

A teherhordó falszerkezetek tűzállósági vizsgálatát az *MSZ EN 1365-1:2013* szabvány szerint kell elvégezni. (A pillért is tartalmazó falszerkezetek vizsgálatával kapcsolatban az *MSZ EN 1365-4* szabvány azt írja elő, hogy amennyiben a pillér egy falszerkezetbe építve jelenik meg, abban az esetben a vizsgálatot az *MSZ EN 1365-1:2013* szabvány szerint kell elvégezni.)

A vizsgálati modellnek teljes mértékben reprezentálnia kell a gyakorlatba szánt szerkezetet. Ha a szerkezet a gyakorlatban vízszintes illesztést tartalmaz, akkor a vizsgálati modellnek is (a felső él alatt 350-650 mm távolságban) tartalmaznia kell egy vízszintes illesztést.
A vizsgálati modell építése során annak függőleges szélei és a vizsgáló keret között 25-50 mm széles hézagot kell kialakítani, és ezt a hézagot rugalmas, nem éghető anyagú hőszigeteléssel úgy kell kitölteni, hogy a függőleges élek szabad mozgása a vizsgálat alatt biztosított legyen.

A teherhordó falszerkezet tűzállósági vizsgálata a tűzhatással egyidejűleg működtetett koncentrikus vagy excentrikus terhelés mellett történik, mely terhelést a vizsgálat megkezdése előtt 15 perccel biztosítani kell.

A vizsgálati modell tűzállósági teljesítményét az *MSZ EN 13501-2:2016* szabványban ismertetett teljesítmény kritériumok alapján kell meghatározni.

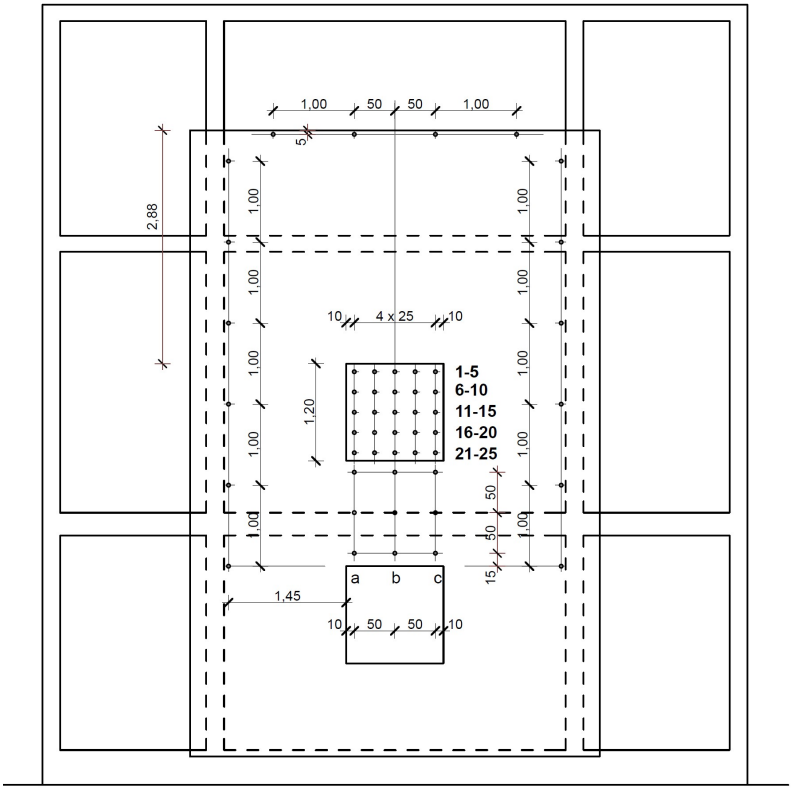
3.3.3.3. Tűzvédelmi osztály meghatározása

A 2020. január 22-én hatályba lépett Építményszerkezetek tűzvédelmi jellemzői c. TvMI 3.2. és 3.4.2. szakasza részletesen rendelkezik a vasbeton falpanelekkel készülő *falszerkezetek* (szerkezeti) tűzvédelmi osztályának meghatározásáról *(TvMI, 2020).*

3.3.3.4. Homlokzati tűzterjedési határérték

A B-D tűzvédelmi osztályú vasbeton szendvicspanelekkel készülő homlokzati falak esetében a homlokzati tűzterjedési határérték jellemző az *MSZ 14800-6:2009* szabvány szerinti vizsgálattal határozható meg. Az ilyen falszerkezetek a szabvány által meghatározott három lehetőség közül az „egyéb szerkezetek" kategóriába sorolhatók, és ennek megfelelően a szerkezeti megoldáshoz illeszkedő egyedi vizsgálati modell kialakítását igényli. A homlokzatvizsgáló berendezés kitöltő falazata eltávolításra kerül, és a panelokat a berendezés vasbeton harántfalaihoz erősítik. A panelok közötti csomópontok, nyílászáró csomópontok kialakítása során a tényleges felhasználásnál alkalmazott megoldásokat kell alkalmazni.

A szendvicspanel falszerkezet belső helyzetű hőszigetelő rétegében történő tűzterjedést kiegészítő hőelemek elhelyezésével lehet ellenőrizni. Az *1. ábra* szerint a modell felső és oldalsó élei mentén kiegészítő hőelemek kerülnek elhelyezésre a hőszigetelés tengelyvonalában. A hőszigetelésben elhelyezett hőelemek 500 °C-nál nagyobb hőmérsékletemelkedése a belső tűzterjedés meg nem engedett mértékét mutatják.



1. ábra: Homlokzatvizsgáló berendezésre felépített vasbeton szendvicspanel fal javasolt kiegészítő hőelemezése. Az első megfigyelőszinti nyílás mögötti hőelem panel már az *MSZ 14800-6:2009* következő változatának tervezete szerint feltüntetve)

3.4. Az "*Előzetes teherfelvétel nagyszilárdságú előregyártott vasbeton bordás födémpanelek terheléses tűzállósági vizsgálatához*" című irányelv tervezet által javasolt kötöttségek és a várható tűzvédelmi jellemzők

3.4.1. Kötöttségek

Az irányelvben leírtak a *3. táblázatban* megadott kötöttségekkel jellemezhető termékekre vonatkoznak.

3.táblázat: A termék kötöttségei

Elemszélesség	max 1730 mm
Lemezvastagság	min 80 mm
Elemmagasság	min 380 mm
Beton jele	C50/60-XC3-16-F5
Műanyag szál adagolás	min 1 kg/m^3
Betonfedés a bordák oldalsó síkjától	min 40 mm
Betonfedés a bordák alsó síkjától	min 95 mm
Bordaszélesség	min. 160 mm
Oldalsó peremkialakítás	egyenes
Bordában alkalmazott feszítőhuzalok	a betonfedés figyelembevételével tetszőleges elrendezésben
Keresztirányú vasalás	keresztirányú vasalással vagy anélkül
Felbeton	90 mm (vasalással vagy anélkül)
Áttörések a lemezen és a bordán	nem lehetséges
Statikai váz	kéttámaszú tartó

3.4.2.Várható tűzvédelmi jellemzők

A *3. táblázatban* szereplő kötöttségekkel megtervezett szerkezet várható tűzállósági teljesítmény jellemzője a *4. táblázatban* található. A közelítő számítást az MSZ EN 1992-1-2 szerint lehet elvégezni.

4. táblázat: A várható tűzállósági teljesítmény

Várható tűzállósági teljesítmény sztenderd tűzhatás, és a hideg teherbírás 70 százalékának megfelelő, tűzhatással egyidejű terhelés alatt	REI 90

A bordás vasbeton födémpanel tűzvédelmi osztálya várhatóan kielégíti az A1 tűzvédelmi osztály követelményeit.

A szomszédos panelok közötti csatlakozás tűzeseti viselkedését külön vizsgálni és értékelni szükséges, amennyiben az elemek szoros illeszkedése nem biztosított, illetve nem alkalmaznak felbetont.

3.4.3. Az irányelv tervezet által javasolt tűzvédelmi vizsgálatok

3.4.3.1. Tűzállósági vizsgálatot megelőző betonösszetétel ellenőrzés

A valós léptékű kemencés vizsgálatokat megelőzően kiselemes vizsgálatokat javasolt végezni. A kiselemes vizsgálatok során 150*150*150 mm kockák és 70*70*250 mm-es hasábok hőterhelését végzik el. A hőterhelés javasolt maximális hőmérséklete 800 °C, a minimális hőmérséklete 500 °C. A próbatesteket egy felfűtött kemencébe kell helyezni egy órás időtartamra. A hőterhelés után a próbatesteket szemrevételezés alapján lehet értékelni. Ha a próbatestek tönkrementek (széthasadtak), akkor a nagyelemes kemencés vizsgálat előtt a betonösszetételt célszerű módosítani, ha nem akkor a nagyelemes vizsgálat elvégezhető.

Amennyiben a beton szilárdsági osztálya nem haladja meg a C30/37 szilárdsági osztályt, és hagyományos összetételű betonról van szó, a beton felület leválásának az esélye nagyon kicsi, tehát előzetes kiselemes vizsgálatra nincs szükség. Szintén elhagyható a kiselemes beton vizsgálat a C30/37 - C50/60 beton szilárdsági osztályok esetén, ha a betonkeverék minimum 1 kg/m^3 kisátmérőjű polipropilén szálat (mikroszálat) tartalmaz.

3.4.3.2. A tűzállósági teljesítmény közvetlen vizsgálata az MSZ EN 13501-2:2016 szabvány szerint

A teherhordó födém- és tetőszerkezetek tűzállósági vizsgálatát az *MSZ EN 1365-2* szabvány szerint kell elvégezni.

A vízszintes vizsgáló kemence tűztérnyílása fölé oly módon kell az előzőleg kondicionált vizsgálati modellt beépíteni, hogy annak egész felülete (beleértve a szélek kialakítását is) ki legyen téve az *MSZ EN 1363-1* szerinti szabványos tűzhatásnak.

A vizsgálati modellnek a födém- vagy tetőszerkezet gyakorlatban használt feltételeit kell mutatnia. Tartalmaznia kell minden szerkezeti részletet, anyagot és összetevőt (beleértve a vízszigetelést is).

A vizsgálati modellnek lehetőség szerint teljes méretűnek vagy (ha a vizsgáló kemence méretei ezt nem teszik lehetővé) legalább 4,0 m hosszúnak és 2,0-3,0 m szélesnek kell lennie. A födém- vagy tetőszerkezetet a gyakorlati kialakítástól függően egy- vagy két irányban teherhordó szerkezetként kell kialakítani, lehetővé téve a hosszirányú mozgást és a szabad lehajlást is.

A teherhordó födém- vagy tetőszerkezetet tűzállósági vizsgálata a tűzhatással egyidejűleg működtetett egyenletes terhelés mellett történik, mely terhelést a vizsgálat megkezdése előtt 15 perccel biztosítani kell. A terhelés nagyságát és eloszlását úgy kell meghatározni, hogy a vizsgálati modellen előállított maximális hajlítónyomaték és nyíróerő a gyakorlatban előforduló mértékű vagy annál nagyobb legyen.

A vizsgálati mintának tartalmaznia kell a beemeléshez szükséges kiegészítő elemeket.

A vizsgálati modell tűzállósági teljesítményét az *MSZ EN 13501-2:2016* szabványban ismertetett teljesítmény kritériumok alapján kell meghatározni.

3.4.3.3. Tűzvédelmi osztály meghatározása az MSZ EN 13501-1:2019 szabvány szerint

A bordás födémpanelek nagyszilárdságú (vas)beton anyaga általában A1 tűzvédelmi osztályú. Nagyobb mennyiségű szerves adalékszer, illetve szál adagolás esetén az *MSZ EN ISO 1716:2019* szabvány szerinti vizsgálattal meghatározott bruttó égéshő, illetve az *MSZ EN ISO 1182:2010* számú nem-éghetőség vizsgálattal lehet igazolni a szerkezet A1 tűzvédelmi osztályát (amennyiben megfelel a kritériumoknak).

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A röviden bemutatott irányelv tervezetekből társadalmasítás és az ÉMSZB általi szavazást követően válhat építésügyi műszaki irányelv. Az irányelv tervezetek készítői bíznak abban, hogy a végleges irányelveket haszonnal alkalmazzák a hazai vasbetonelem gyártó cégek.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 "Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

6. HIVATKOZÁSOK

1997. évi LXXVIII. törvény az épített környezet alakításáról és védelméről (Étv)
36/2016. (XII. 29.) MvM rendelet az Építésügyi Műszaki Szabályozási Bizottságról
6/2019. (IV. 4.) ITM rendelet az Építésügyi Műszaki Szabályozási Bizottságról
Az Európai Parlament és a Tanács 305/2011/EU rendelete (2011. március 9.) az építési termékek forgalmazására vonatkozó harmonizált feltételek megállapításáról (CPR)
Papp I., Tóth P. (2020): Új építésügyi műszaki irányelv a faanyagvédelem témakörében. http://www.fataj.hu/2020/10/152/202010152_Favedelem.php.
MSZ 14800-6:2009 Tűzállósági vizsgálatok. 6. rész: Tűzterjedés vizsgálata épülethomlokzaton.
MSZ EN 1363-1:2013 Tűzállósági vizsgálatok. 1. rész: Általános követelmények
MSZ EN 1365-2:2015 Teherhordó elemek tűzállósági vizsgálata. 2. rész: Födémek és tetők
MSZ EN 13224:2012 Előre gyártott betontermékek. Bordás födémelemek
MSZ EN 13501-1:2019 Épületszerkezetek és építési termékek tűzvédelmi osztályozása. 1. rész: Osztályba sorolás a tűzveszélyességi vizsgálatok eredményeinek felhasználásával
MSZ EN 13501-2:2016 Épületszerkezetek és építési termékek tűzvédelmi osztályozása. 2. rész: Osztályba sorolás a tűzállósági vizsgálatok eredményeinek felhasználásával, a szellőzőrendszerek kivételével
MSZ EN 1365-1:2013 Teherhordó elemek tűzállósági vizsgálata. 1. rész: Falak
MSZ EN 14992:2007+A1:2013 Előre gyártott betontermékek. Falelemek
MSZ EN ISO 1182:2010 Termékek tűzveszélyességi vizsgálatai. A neméghetőség vizsgálata (ISO 1182:2010)
MSZ EN ISO 1716:2019 Termékek tűzveszélyességi vizsgálatai. A bruttó égéshő (fűtőérték) meghatározása (ISO 1716:2018)
Tűzvédelmi Műszaki Irányelv TvMI 11.2. 2020.01.22. Építményszerkezetek tűzvédelmi jellemzői.

BETON VIZSGÁLATA CT-VEL

Lublóy Éva - Hlavička Viktor - Kapitány Kristóf - Balázs L. György

BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék
1111 Műegyetem rakpart 1-3

ÖSSZEFOGLALÁS

A CT orvosi diagnosztikai alkalmazása ma már széles körben elterjedt, azonban az anyagvizsgálatok területén alkalmazásuk még egyáltalán nem vagy kevésbé ismert. Tekintettel arra, hogy az építőanyagok nagy része inhomogén, tehát található benne sűrűségkülönbség, ezért az anyagszerkezetük CT-vel jól vizsgálható. Továbbá az anyagszerkezeti leromlások során az anyagos sűrűsége, szerkezete lényegesen megváltozik ezért ezek a folyamatok is vizsgálhatók CT segítségével.

A minták kiértékelése alapján megállapíthatjuk, hogy a CT felvételek segítségével a tűzkárosodott és a fagy hatás során leromlott minták pórus szerkezet változása nyomon követhető és kimutatható.

1. ELŐZMÉNY

A 2017. március 1 és 2020. október 30 között *NVKP- 16 Fokozott ellenállóképeségű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése* című projekt keretén belül a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke kiterjedt kutatásokat végzet a különböző szerkezeti elemek tűzállóságának fokozására.

A pályázat célja

> *tűzhatásra olyan optimális betonösszetétel kifejlesztése, amit az előregyártás során megfelelő technológia mellett alkalmazni tudnak.*

Ezen cikk keretén belül a komputertomográfia (CT) alkalmazási lehetőségeit ismertetjük beton esetén. A részjelentés keretén belül megvizsgáljuk az eddigi CT alkalmazásokat (betonon, és aszfalton), és további alkalmazási lehetőségeket keresünk.

2. A CT MŰKÖDÉSE

A CT (Computed Tomography) a szakirodalomban számítógépes tomográfia néven ismeretes, mely a radiológiai diagnosztika egyik ága. A számítógépes tomográfia vizsgálatokkal a minták háromdimenziós elemzése válik lehetővé.

Egy minta kis léptékű (mm) térbeli belső felépítéséről a legtöbb módszerrel nehéz megbízható módon, roncsolásmentesen képet alkotni. Hagyományos optikai vagy elektronmikroszkóppal roncsolásmenetes módon csak felületi kép készíthető. A minta felszeletelése után lehetőség van egy-egy vékony szeletről további képek készítésére is, de ez meglehetősen időigényes, és a szeletek elkészítésekor megváltozhat a minta belső szerkezete, így a három-dimenziós eredeti

belső szerkezetre a legtöbb esetben nehéz megbízható módon következtetéseket levonni. A hagyományos röntgenképek tartalmazzák a teljes három-dimenziós belső szerkezet vetületi képét, azonban egyetlen ilyen felvételből nem nyerhető ki a mélységi információ. A röntgen számítógépes tomográfiával (X-ray computed tomography, CT) lehetővé válik a teljes háromdimenziós belső szerkezetről a képalkotás anélkül, hogy szükség volna a minták előkészítésére vagy kémiai fixálásra.

A CT készülékek röntgensugárzást használnak a felvételek elkészítéséhez, de a sugarak nem filmre exponálnak, hanem detektorok segítségével érzékelik a röntgensugarakat, majd a detektorokból nyert elektromos jelekből készül el számítógép segítségével a rekonstruált keresztmetszeti kép.

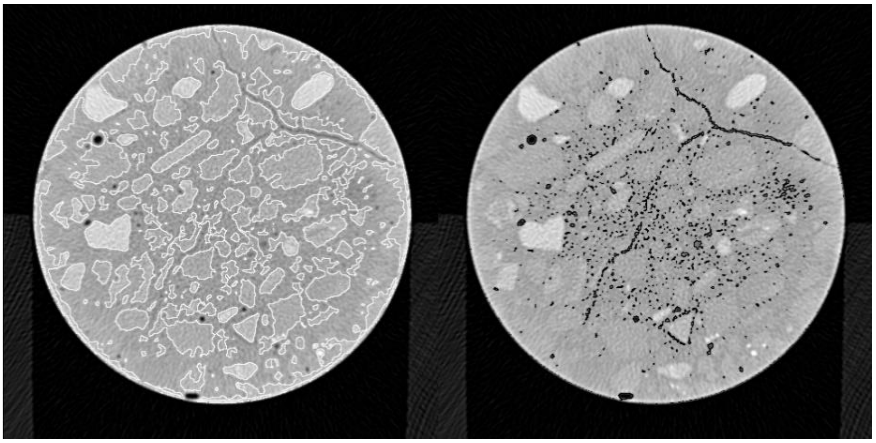
A CT alapelve, hogy a vizsgált testet több irányból is meg lehet röntgenezni, majd a létrejött abszorpciós profilokból egy számítógép segítségével rekonstruálható a test keresztmetszete. Ahhoz, hogy több irányból is felvétel készülhessen a vizsgált objektumról, rendszerint a sugárforrást mozgatják a test körül, míg a mozgását követi a detektorsor az átellenes oldalon.

A komputertomográfiát elsősorban orvosi vizsgálatokra használják. Ma már nem kérdés, hogy ha részletes képet szeretne kapni a szakorvos páciense egyik szervéről, akkor fejlett diagnosztikai eszközöket használ. Ezek közül az egyik legkiemelkedőbb a CT készülék. Alkalmazását az 1970-es években kezdték el, azonban ekkor még rendkívül fejletlen, homályos képet eredményezett a vizsgálat, mely hosszú idő alatt készült el.

Az egyes projekciókból kapott intenzitás görbe a vizsgált test egy metszetének egydimenziós képe. A több projekcióból kapott intenzitásgörbék feldolgozása után (filtered backprojection) kapjuk meg a vizsgált test egy adott szeletének kétdimenziós képét. Ez a kép a számítástechnikában egy mátrixnak feleltethető meg, amelynek egyes elemei a testen mért térfogategység sugárgyengítésének felel meg. A képrekonstrukció során a képmátrix egyes elemeit (az anyag 2D metszetének darabjai pixel szinten) ismeretleneknek feltételezzük. Az intenzitásgörbék által kapott értékek és a képmátrix egyes sorai/oszlopai között meghatározunk egy összefüggést, amelyet megoldva kapjuk meg az egyes mátrixelemek valódi értékét. Ha kellően túlhatározott az egyenletrendszer, akkor az egyes mátrixelemek ekként könnyen meghatározhatók.

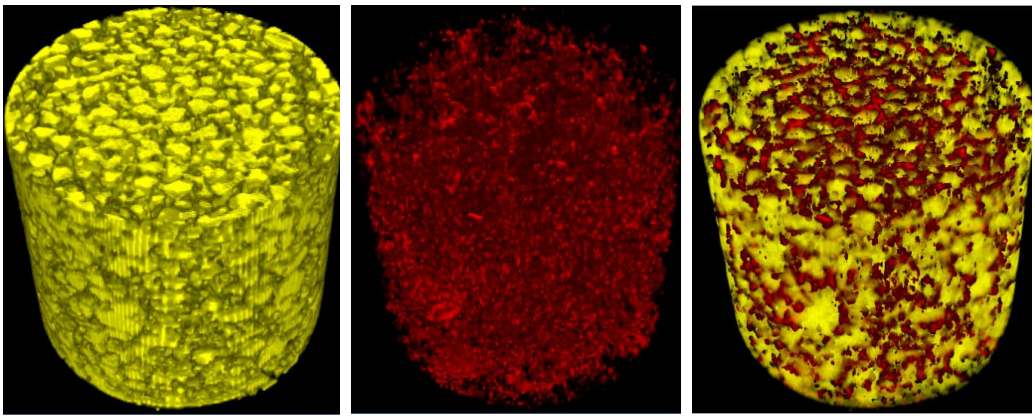
A kép feldolgozása során számos szűrőt alkalmaznak, azért, hogy javítsák a képminőséget, mert a rekonstrukció közben zavaró árnyékok jelenhetnek meg a képen, továbbá elmosódások képződhetnek (például a CT mozgása miatt). Ezeket az eljárásokat a vizsgált objektum ismeretében speciálisan arra a felhasználásra állítják be.

A hagyományos röntgen vizsgálatnál a testből kilépő sugárzás a filmen feketedésként jelenik meg. Minél kisebb az anyag sugárgyengítési együtthatója, annál nagyobb sugárzás éri a filmet, így sötétebb lesz a film. A nagyobb sugárgyengítési együtthatójú anyagok esetén kisebb a testből kilépő sugárzás, ami a filmen világosabb területként jelenik meg. A komputertomográfiás (CT) felvételeken a vizsgálat tárgya szeletekre bontva látható. A CT adatmátrixból vizualizált kép első közelítésben úgy kezelhető, mint egy szeletfelbontásnak megfelelő sűrűségtérkép az adott anyagokról *(1. ábra*). Ezen a sűrűség képen jól kirajzolódnak a vizsgált tárgy különböző sajátosságai (adalékanyag szemcsék, pórusok, repedések).



1. ábra: Az adalékanyag- (fehér körvonal) és pórusrendszer (fekete körvonal) CT rétegfelvételen (beton próbatest) *(Balázs, Lublóy, 2014; Lublóy Balázs, Kapitány, Barsi, Földes 2014)*

A CT felvételek feldolgozása és elemzése *Matlab* környezetben írt algoritmusokkal, automatikus módon, előre beállított paraméterekkel történik. Az adalékanyagok, kötőanyagok és a hézagok/pórusok szegmentálása küszöböléssel (thresholding) történt, de a CT felvételek zajossága miatt az algoritmusban képfeljavító eszközöket is alkalmaztunk. Ezek közé különböző szűrők (például átlagoló szűrő) tartoztak, valamint külön foglalkoznunk kellett a CT-re jellemző nyalábkeményedési korrekcióval is. Utóbbi a homogén anyagon áthaladó röntgensugár gyengülését hivatott korrigálni. A kialakított algoritmusok egyenként elvégzik a CT felvételeken a szegmentálást, majd elemzés után szeletenkénti térfogat százalékos statisztikákat állítanak elő. Az eredményeket táblázatos formában is rögzíthetjük, és további statisztikai számításokra is felhasználhatjuk, nem csupán szeletenként, hanem a teljes magmintára vonatkozóan is. Az előállított eredmények közé nem csupán a kinyert statisztikák tartoznak, hanem a köztes lépésekben előállított szegmentált felvételek is, melyek alkalmasak a mintán belüli különböző komponensek láthatóvá tételére (*2. ábra*).



a) b) c)

2. ábra: A minta 3 dimenziós felvétele. a) adalékanyag eloszlás, b) pórus eloszlás, c) adalékanyag és a póruseloszlás

3. A CT-VEL ELÉRT EDDIGI EREDMÉNYEK

A CT orvosi diagnosztikai alkalmazása ma már széles körben elterjedt, azonban az anyagvizsgálatok területén alkalmazásuk még egyáltalán nem vagy kevésbé ismert. A CT a sűrűségkülönbségek mérésére szolgál, ezért azt kell megvizsgálnunk, hogy az anyagvizsgálatok mely területén elegendő a sűrűségkülönbség mérése, és mely tulajdonságok, illetve milyen anyagszerkezeti változások jellemezhetőek sűrűségkülönbség méréssel. Tekintettel arra, hogy az építőanyagok nagy része inhomogén, tehát található benne sűrűségkülönbség, ezért az anyagszerkezetük CT-vel jól vizsgálható. Továbbá az anyagszerkezeti leromlások során az anyagos sűrűsége, szerkezete lényegesen megváltozik ezért ezek a folyamatok is vizsgálhatók CT segítségével.

A kutatás során komoly kihívást jelent a CT felvételek kiértékelése, a CT felvételek zajossága miatt, a kiértékelés során képfeljavító eszközöket is alkalmaztunk. Ezek közé különböző szűrők (például átlagoló szűrő) tartoztak, továbbá külön foglalkoznunk kellett a CT-re jellemző nyalábkeményedési korrekcióval is (http://oftankonyv.reak.bme.hu/).

3.1 Aszfalt vizsgálat

CT vizsgálat magmintákon végzett roncsolás mentes, nagy felbontású (akár 0.06 mm x 0.06 mm x 0.06 mm) 3D anyagvizsgálat, melynek eredménye egy digitális, első közelítésben a sűrűséggel arányos adatrendszer. A módszerrel a laborba szállítandó magminták paramétereit lehet nagy felbontásban 3D-ben meghatározni.

A CT mérések felhasználása segítségével a hagyományos laborvizsgálati eredmények kiértékelése is megbízhatóbbá válik. Az aszfalt tartósságát nagymértékben befolyásolja az aszfalt pórusszerkezete.

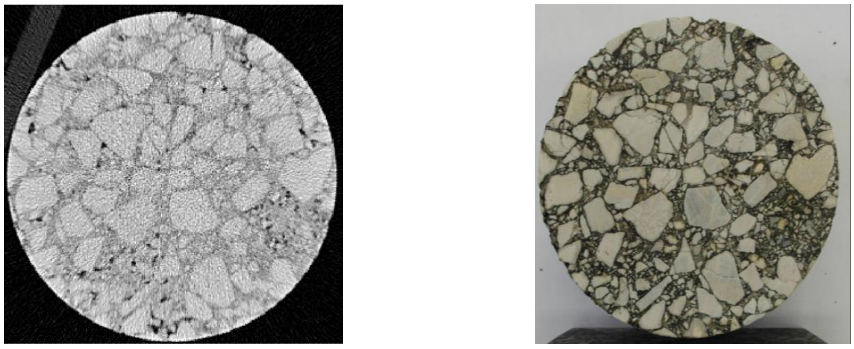
Ha az aszfalt pórusszerkezetébe bele látunk, és teljes mértékben ismerjük, akkor az aszfaltról kiegészítő információt kaphatunk, melyeknek vizsgálata analitikai módszerekkel csak részben lenne lehetséges. Az MSZ EN 12697-6:2012 testsűrűség vizsgálat és a MSZ EN 12697-5:2010 hézagmentes testsűrűség vizsgálat, valamint a MSZ EN 12697-8:2003 hézagtartalom vizsgálat teljes kiváltása és pontosabb meghatározása válik lehetővé a CT-vel.

A CT segítségével meghatározható lesz a rétegeken belüli adalékanyag szemeloszlás, ami laboratóriumi vizsgálatokkal nem lehet meghatározni. Mindezek mellett károsodott (repedezett, nyomvályús) szerkezetek vizsgálat is lehetővé válik, amit a laboratóriumi vizsgálatokkal nem lehetett volna elvégezni. A károsodás mértéke is meghatározható lesz, így javításuk is egyszerűbbé válik. A CT által előállított 3 dimenziós képet digitális formája miatt a végeselemes modellezésekhez is használhatjuk, ami segítségével az útpályaszerkezet teherbírása becsülhető, számítható lehet.

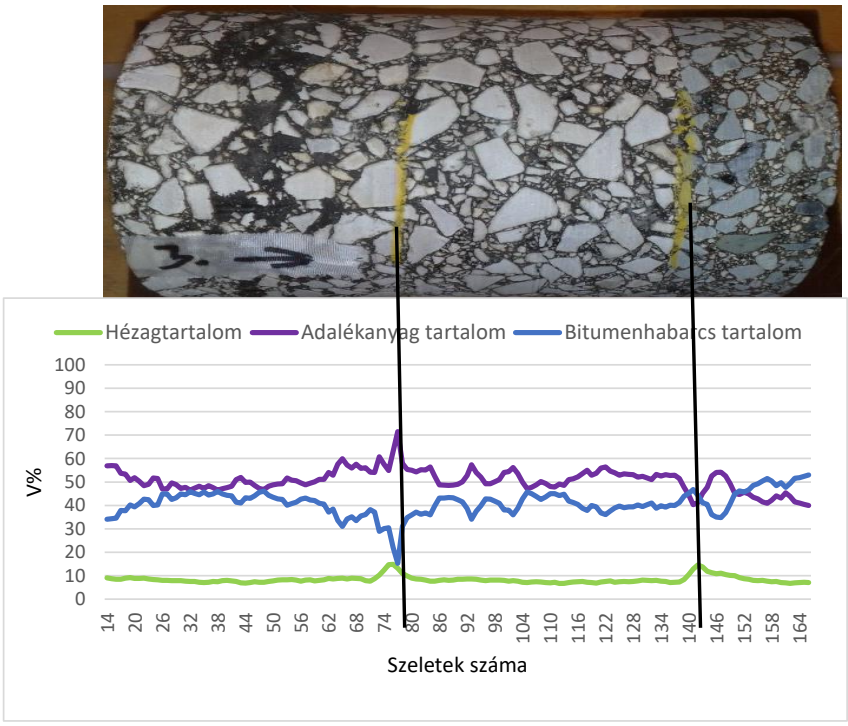
A felvételeken a különböző sűrűségű anyagokat szétválasztottuk, szegmentáltuk *(3. ábra)*. A CT felvételek feldolgozása és elemzése Matlab környezetben írt algoritmusokkal, automatikus módon, előre beállított paraméterekkel történt. Az adalékanyagok, kötőanyagok és a pórusok szegmentálása küszöböléssel (thresholding) történt. A kialakított algoritmusok egyenként elvégzik a CT felvételeken a szegmentálást (*Russ*, 2011)., majd elemzés után előállítják a szeletenkénti térfogatszázalékos statisztikákat. A módszer határai közé tartozik, hogy orvosi CT-vel a 4 mm alatti adalékanyag szemcsék nem szegmentálhatóak, ennek szegmentálása csak

mikro vagy nano CT-vel megoldható, de ez építőanyagok esetén a korlátozott minta méret miatt nem, vagy csak nehezen alkalmazhatóak ezek az eljárások.

Aszfalt minta esetén a hézagtartalom eloszlás alapján a réteghatárok is egyértelműen beazonosíthatóak *(3. ábra)*, mivel a réteghatároknál a hézagtartalom jelentősen megnő. Ennek oka, hogy a burkolat készítésekor hideg aszfalt felületre meleg réteget visznek fel, és az összedolgozás során a két réteg között egy nagy hézagtartamú rész keletkezik.



a) Egy keresztmetszetről készült CT felvétel, és azonos területről készült keresztmetszeti csiszolat

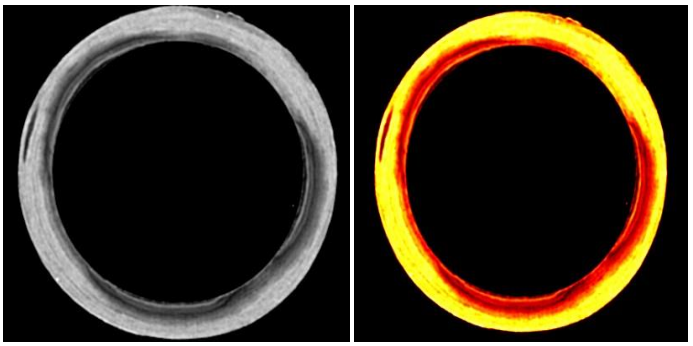


b) Aszfalt mintában az adalékanyag-, a hézag- és a kötőanyag-tartalom eloszlása, valamit a réteghatárok azonosítása

3. ábra: A minta szegmentálása és kiértékelése a CT felvéltelek alapján *(Lublóy, Ambrus, Kapitány, Barsi, 2015; Lublóy Ambrus, Kapitány, 2014, Lublóy, Földes, Ambrus, Kapitány, Barsi, 2014, Lublóy, Ambrus, Földes 2014)*

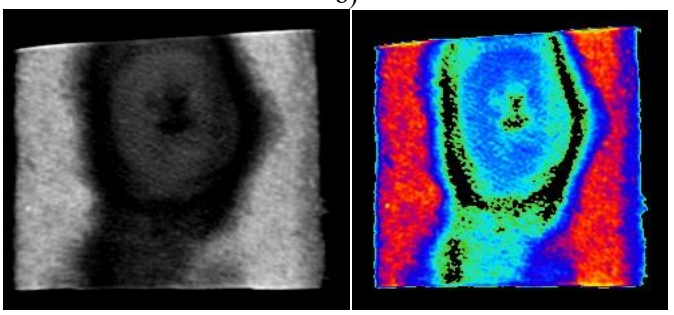
3.2 Azbesztcement cső vizsgálata

A *4 ábra* az azbesztcement csőről készült számítógépes tomográfiával felvételt ábrázolja. A CT felvételen a károsodott helyen a cső teherbíró részének elvékonyodása tapasztalható. A CT felvétel élességének módosítás után a levált felület jól elkülöníthető a CT képeken, úgy ahogy a metszetről készült fényképfelvételen is. a képen a világosabb színek a magasabb Hounsfield értékű (sűrűségű) területeket adják meg, a sötétebb részek pedig az alacsonyabb sűrűségű részeket. A sűrűség csökkenésből mindig valamilyen anyagszerkezeti leromlásra következtethetünk.



a) az azbeszt cső keresztmetszete

b)



c) a károsodott rész környezete

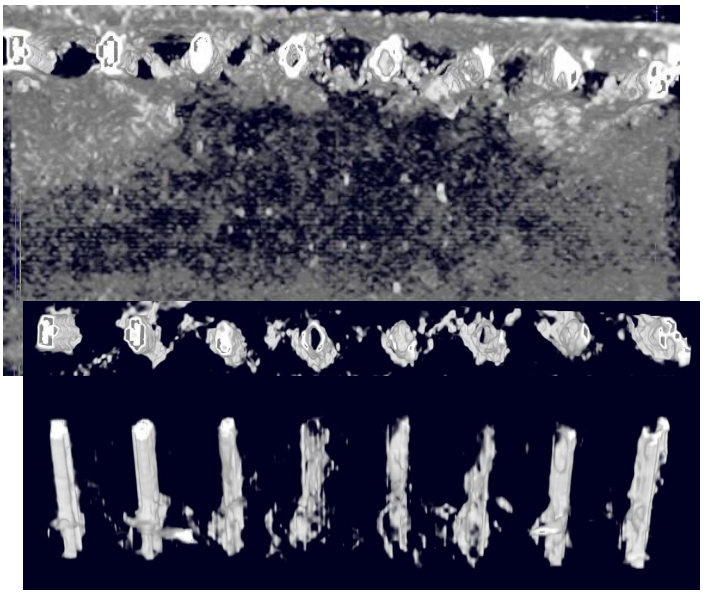
4 ábra: Az azbeszt csövekről készült felvételek *(BME, 2012)*

A *4 ábra* a károsodott rész környezetét szemlélteti. Jól látszik, hogy a károsodott a sűrűség értéke jelentősen csökkent, ami azt jelenti, hogy az anyag sűrűség is jelentősen csökkent. A sűrűségcsökkenés nem egyenletesen következik be, hanem rétegesen, ez a réteges sűrűség csökkenés magyarázza azt a tényt, hogy más roncsolásmentes vizsgálat elég nehezen kivitelezhető.

3.3 SENTAB feszített vasbeton cső vizsgálata

A SENTAB (feszített vasbeton cső) csövekről készült CT felvételen jól látható, hogy a rozsdásodott foltok (3 folt) alatt az acélbetétek elszakadtak ***(5 ábra)***. A nagy rozsdafolt alatt a beton károsodását (kiüregelődését) is megfigyeltük. Az üreg közvetlen környezetéről felvételeket készítettünk. A megállapíthatjuk, hogy az acélbetétek környezetében kisebb sűrűségű rész látható. Az *5 ábra* az elszakadt acélbetétek keresztmetszetét szemléltei. A

felvételeken megfigyelhető, hogy az acélbetétek közepén kiüregelődés van, amihez hasonlót az Orlay utcai csőtörésnél is megfigyeltünk (*BME, 2012*).



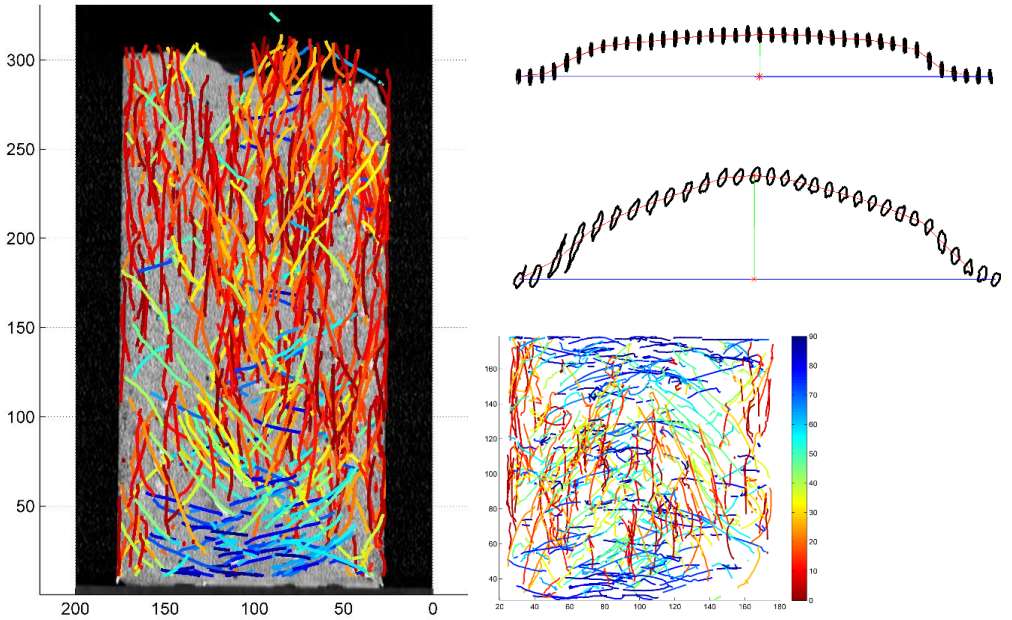
5 ábra: A SENTAB csövek vizsgálata CT-vel *(BME, 2012)*

3.4 Szálerősített beton vizsgálata

A száltartalom és a keverési idő szálorientációra, szálelhelyezkedésre való hatásának vizsgálatához CT vizsgálatot végeztünk szálerősítésű betonokon *(6 ábra)*. A CT vizsgálatot száladagolást követő 5 percig kevert, 0.3 V% száltartalmú, illetve 0.5 V% száltartalmú keverékből, és a száladagolást követő 30 percig kevert, 0.5 V% száltartalmú keverékből készült 1-1 db fél gerendán végeztük.

A CT felvételék alapján a következőket figyeltük meg:

- Száltartalom változtatásának nem volt jelentős hatása a szálelhelyezkedésben. A szálak betonban való hosszabb keverési ideje (5 perc helyett 30 perc) egyenletesebb száleloszlást eredményezett, azonban nem szüntette meg teljesen a lokális szálfeldúsulásokat.
- -A szálak irányultságát jelentősen befolyásolta a betonba adagolt szál mennyisége. A nagyobb (0.5V%) száltartalom esetén a szálak már rétegesen irányítottá váltak.
- Vizsgálataink során kimutattuk, hogy 150×150×600 mm élhosszúságú próbatestek zsaluzott oldalain a szálak a zsaluzat irányába rendeződtek, míg a próbatest közepén véletlen irányultságúak voltak.
- A szálirányultságra nem volt jelentős hatása keverési idő változtatásának. Azonban jelentős hatása volt a bedolgozásban, illetve tömörítésben végzett kisebb változtatásoknak.
- Kimutattuk, hogy az acél szálak egy része a betonban való keverés hatására deformálódhat. A deformáció mértéke és gyakorisága csak kis mértékben növekedett a hosszabb (5 perc helyett 30 perc) keverés hatására.



6 ábra: Az acél szálerősítésű betonok száleloszlás elemzése

3.5 Fagyállóság vizsgálata

A kísérletek során két betonösszetételt vizsgálatunk *(1. táblázat)* Az M1 jelű betonkeverék szilikapor nélkül készült, az M2 keverékek a cement tömegére vonatkoztatva 3 m% szilikaport tartalmazott.

1. táblázat: Beton receptúrák (az értékek kg/m^3-ben megadva)

összetevők	M1	M2
cement (CEM I 42.5N)	400	400
szilikapor	-	12
víz	140	140
adalékanyag 0-4 mm	755	748
adalékanyag 4-8 mm	472	468
adalékanyag 8-16 mm	661	655
folyósító	5	5
víz-cementtényező	0,35	0,35
víz-kötőanyagtényező (kötőanyag=cement+k*szilikapor tartalom, ahol (k=1 értéket vettünk)	0,35	0,33

A beton próbatesteken a következő vizsgálatokat végeztük a CT vizsgálatokkal párhuzamosan:

- nyomószilárdság vizsgálat,
- hajlító-húzószilárdság vizsgálat,
- teljes porozitás vizsgálat,
- látszólagos porozitás vizsgálat,

- fagyállóság vizsgálat.

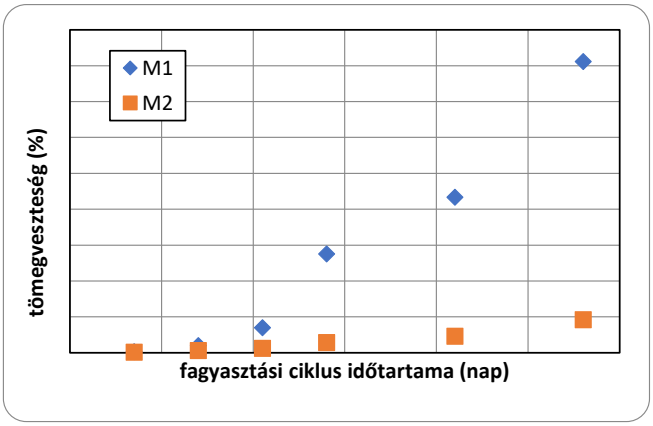
A *nyomószilárdságot* 60 mm átmérőjű és 120 mm magasságú hengereken mértük. A *hajlító-húzószilárdságot* 70x70x250 mm nagyságú hasábokon vizsgáltuk. A *nyomó-, illetve a hajlító-húzószilárdság* vizsgálatot 3-3 próbatesten végeztük el a mérési eredmények átlagértékeit a *2. táblázat* foglalja össze.

2. táblázat: A beton vizsgált jellemzői (a megadott értékek 3-3 vizsgálat átlagát mutatják)

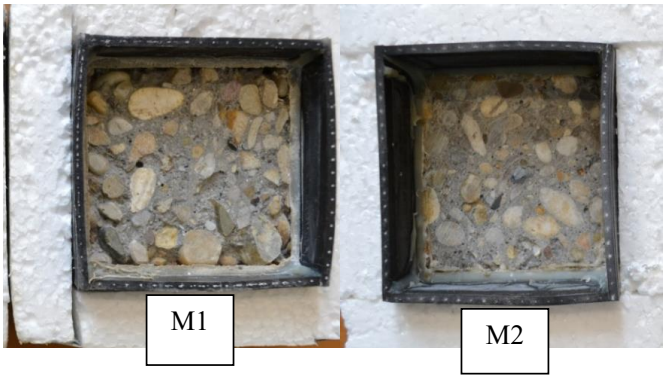
Beton keverék jele	Teljes porozitás [%]	Látszólagos porozitás [%]	Nyomószilárdság [N/mm^2]	Hajlító-húzó szilárdság [N/mm^2]
M1	9,23	8,00	57,4	9,2
M2	11,67	9,49	68,0	9,2

A *teljes porozitás* meghatározásához szükség van a testsűrűség és az anyagsűrűség meghatározására. A testsűrűség meghatározását szabályos alakú testek esetén a befoglaló méretek és a tömeg megmérése után határoztuk meg. Az anyagsűrűség mérését piknométerrel végezzük el. A piknométeres méréshez az anyagot olyan mértékig porítani kell, hogy átessen a 0,2 mm lyukbőségű szitán. A piknométeres mérés lényege, hogy meghatározzuk a porított anyag térfogatát a folyadékkiszorítás elve alapján.

Kísérleteink során *fagyhámlasztásos* (MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szerint) vizsgálatot végeztünk. A próbatesteket 70*70 mm alapterületű hasábokból alakítottuk ki, a próbatestek magassága 50 mm volt. A próbatesteket először az előrajzolásnak megfelelően daraboltuk, ezután a szabványnak megfelelően a külső felületére gumi lapot, majd arra duzzasztott polisztirol lapot ragasztottunk. A gumilap és a próbatest felülete közti részt szilikonnal töltöttük ki. A vizsgálat megkezdése előtt a próbatesteket 3 napig desztillált vízben áztattuk. Ezután kezdtük el a fagyhámlasztásos vizsgálatot, amit Schleibinger típusú fagyasztószekrényben 3%-os NaCl oldattal feltöltött próbatesteken végeztük el. A próbatesteket lemértük a fagyasztás megkezdése előtt, továbbá a fagyasztás 7., 14., 21., 28., 42. és 56. napján. Az eredményeket a *7 ábra* szemlélteti. A tömegveszteség értékéből jól látható, hogy az M1 jelű keverék sokkal érzékenyebb volt fagyasztásra, mint az M2 jelű keverék. A *8. ábra* a fagyasztás után lefényképezett próbatestek felületét ábrázolja.

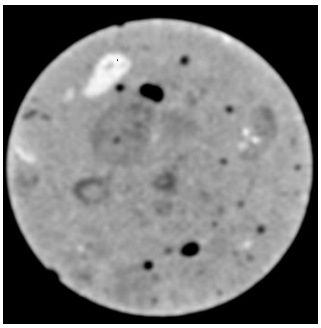


7 ábra: Mért tömegveszteség a fagyasztás után



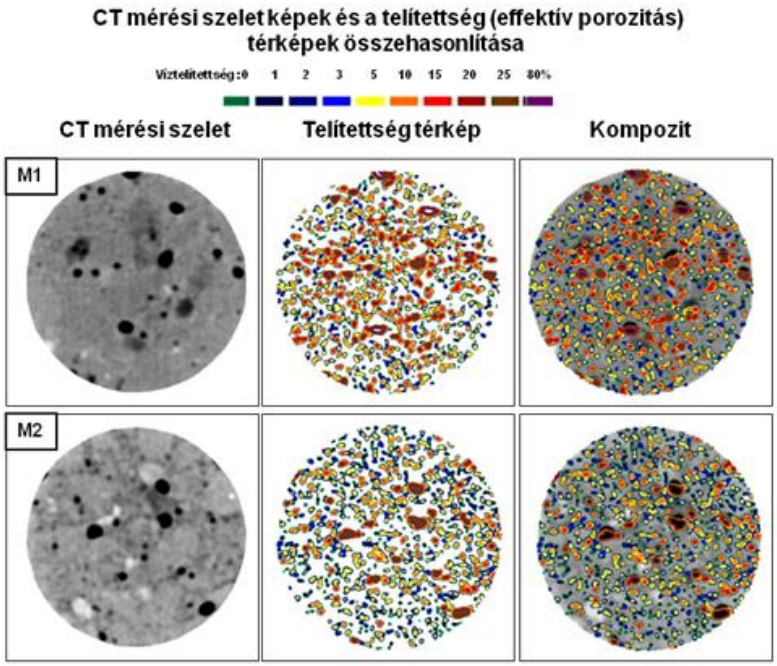
8. ábra: Próbatestek felülete a fagyasztás után

A betonhengerek elvágása után kapott képet összehasonlítottuk a CT-vel készített felvétel megfelelő szeleteivel. A henger elvágása után készített fénykép fevételen az adalékanyag szemcsék, a megszilárdult cementpép részek és a pórusok jól elkülönülnek (*9. ábra*). A CT felvételen csak néhány adalékanyag szemcse elkülönülését figyelhetjük meg, amit a megszilárdult cementpép és az adalékanyag közel azonos sűrűségével magyarázhatunk. A pórusrendszer viszont sokkal egyéretelműbben elkülönül a CT-vel készült felvételen, mint a betonhenger metszetéről készült felvételen. A CT-vel készült felvételen a szabad szemmel nem látható pórusok is megfigyelhetőek, ami lehetővé teszi a teljes pórusrendszer pontosabb feltérképezését.

a)  b) 

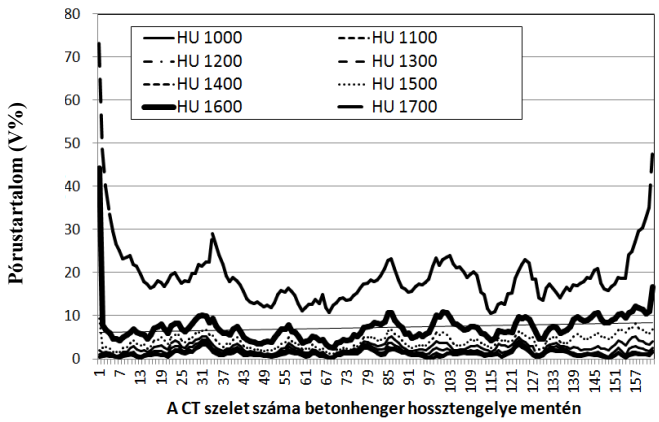
9. ábra: A vizsgált betonhenger metszetei; a) CT-vel készített felvétel; b) A CT vizsgálat után, azzal megegyező helyén átfűrészelt betonkeresztmetszet fénykép felvétele

A kísérleteink alapján készített telítettségi térképén (vízzel való telítés után) meghatározható, hogy mely pórusokba hatol be a víz és mely pórusok zártak *(10 ábra).* Az ábrán jól látszik, hogy az M2 keverék kevesebb pórust tartalmaz mint, az M1 jelű keverék. Az M1 jelű beton telítettségi térképén is látszik, hogy a teljes és a látszólagos porozitás közel esnek egymáshoz, hiszen majdnem minden pórus vízzel telített (sok a sötét árnyalat). M2 keverék esetén a pórusok nagy része nem tud vízzel telítődni, ez a beton várhatóan tartósabb lesz, mint az M1 beton.

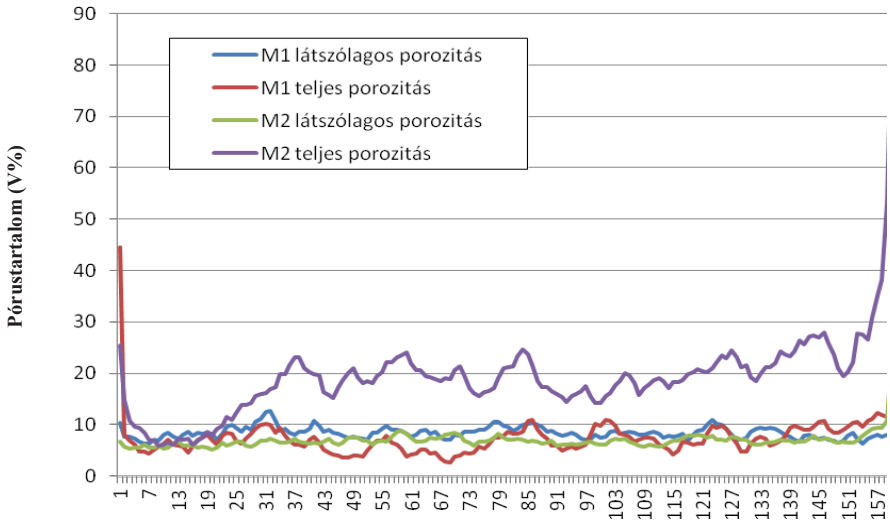


10 ábra: A vizsgált betonhengerek pórusainak vízzel való telítettségi térképe

A *11. ábra* megadja az egyes szeleteken a különböző Hounsfield értekhez tartozó gyakoriságokat. Az ábra segítségével megállapíthatjuk, hogy a teljes porozitás értékének megállapításakor az 1600-as HU értéket kell figyelembe venni, mivel az 1600-as és az 1700-as HU vonal között már nagy ugrás van, tehát itt a mérés már az adalékanyag, illetve a cementkő egy részét is tartalmazza. A teljes porozitást és a látszólagos porozitást (amit a telített pórusok térfogat arányából határoztunk meg) a *12. ábra* adja meg. A CT-vel készített porozitás számítás jól megközelíti a mért értékeket.



11. ábra: A különböző HU értékek sűrűség eloszlása az egyes szeleteken belül



12. ábra: A teljes és a látszólagos porozitás

A CT mérés technika segítségével kapott mérési eredményeink rávilágítottak a beton belső szerkezetének inhomogeneitására a kialakult repedésekre, a meglévő pórusszerkezetre és a fagyasztási ciklusok során bekövetkező belső elváltozásokra.

3.6 Tűzkárosult szerkezetek vizsgálata CT-vel

Két órás tűzterhelésnek alávetett, tűzkárosult tübbing elemből (*13. ábra)* magmintát (*14. ábra*) fúrtunk. A magmintáról CT felvételeket készítettünk. A felvételeken az adalékanyagokat, a cementhabarcsot és a pórusokat szétválasztottuk *(15. ábra).* A kialakított algoritmusok egyenként elvégzik a CT felvételeken a szegmentálást, majd elemzés után előállítják a szeletenkénti térfogatszázalékos statisztikákat (*15. ábra és 16. ábra*). Az eredmények táblázatos formában rögzítjük, és további statisztikai számításokra is lehetőséget biztosítanak, nem csupán szeletenként, hanem a teljes magmintára vonatkozóan is.

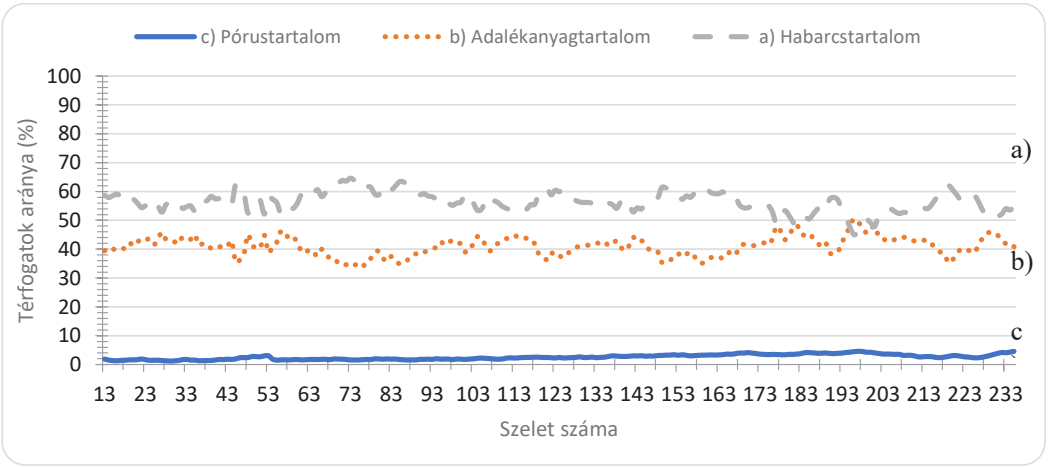
A görbéken látható csúcsok azzal magyarázhatók, hogy a szeleteken belül eltérő lehet az adalékanyag és a habarcstartalom. Jól látható, hogy a 100 jelű szelettől a porozitás megnő, ezért a pórustartalmat külön is ábrázoltuk *(16. ábra)*. A 200-230 jelű szeletek közötti alacsony porozitásértéket a magas adalékanyag tartalom magyarázza (lásd *15. ábra b*) jelű görbe). Ezek alapján a beton felület felső 100 mm vastagságú része károsodottnak tekinthető, ami szilárdságcsökkenésre utal.



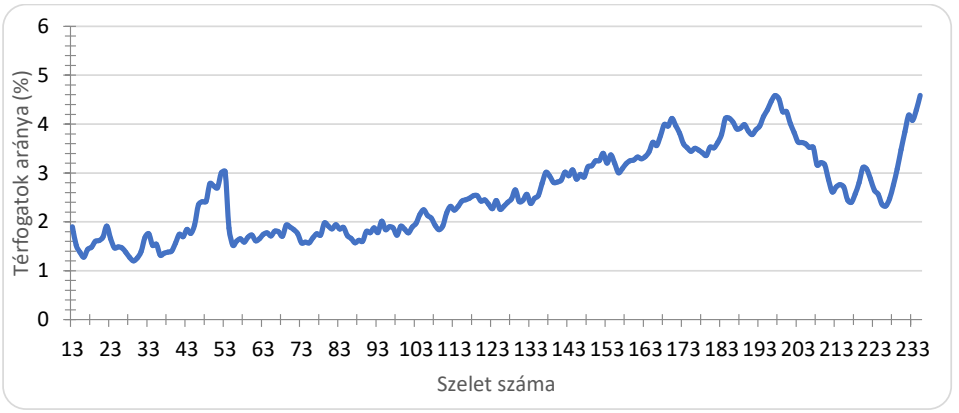
13. ábra: Mintavételi helyek tűzkárosult szerkezeten (fénykép, *Balázs Lublóy, Földes, 2015*)



14. ábra: A tűzkárosult szerkezetből vett magminta (fénykép, *Balázs Lublóy, Földes, 2015*)



15. ábra: Az adalékanyag, cementkő és a pórusok eloszlása az egyes szeleteken belül



16. ábra: A pórusok eloszlása az egyes szeleteken belül (*15. c. ábra* felnagyított képe)

Ezek alapján megállapíthatjuk, hogy a CT jó lehetőséget nyújt a tűzkárosult épületek vizsgálatához.

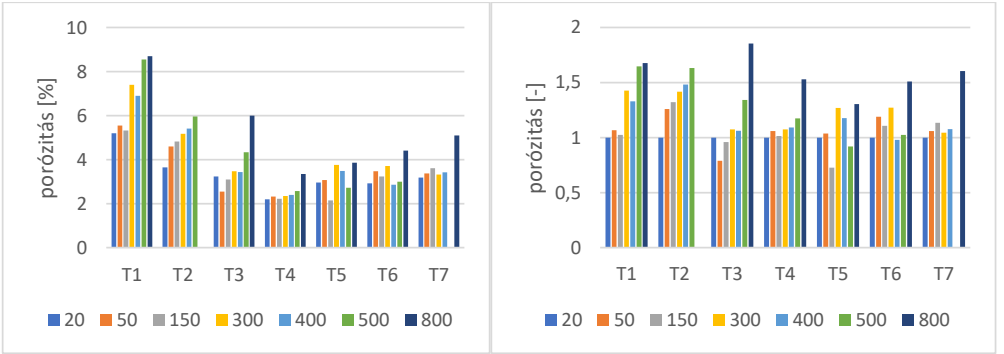
4 A CT-VEL A PROJEKT SORÁN ELÉRT EREDMÉNYEK

4.1 Tűzállóság

4.1.1 Kiselemes vizsgálat eredményei

A CT vizsgálatok képi elemzése során a következő megállapításokra jutottunk *(17. ábra):*

- a 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, a cement kő elvált az adalékanyagtól,
- az 500 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete károsodott, a cement kő és az adalékanyag felületén repedések keletkeztek,
- 150 °C felett az adalékanyagok jobban szegmentálhatóak, mint az alatt, ami azt jelent, hogy ezen hőmérséklet felett a cementkő sűrűsége elkezd csökkeni,
- a határfelület károsodásának mértéke kisebb volt a zúzott adalékanyagú betonok esetén (T1 és T2 minta). Ezt az adalékanyag eltérő hőtágulásával, illetve az adalékanyag eltérő felületi kialakításival magyarázhatjuk, vagyis a kvarckavics felülete sima a zúzott kő felülete érdes, tehát máshogy tapad, rá a cementkő és ezáltal eltérő hőérzékenységű határfelület alakulhat ki.



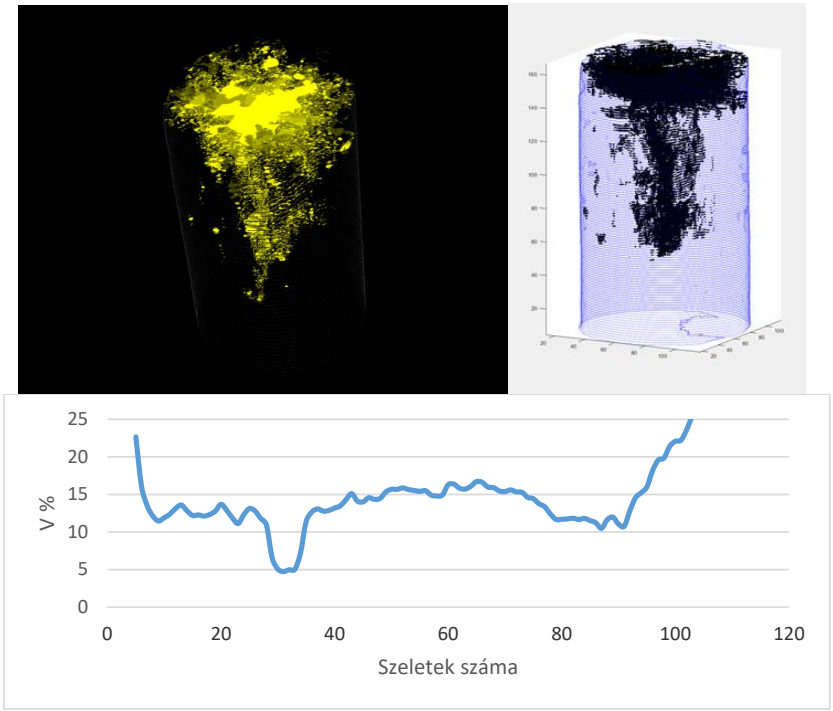
17. ábra: Az alapreceptek betonjának a porozitás változása, CT mérés alapján meghatározva, a hőmérséklet függvényében

4.1.2 A Nagyelemes vizsgálat eredményei

A falpanelelem alsó elemrészen bekövetkezett betonfelület leválása. A tűzvizsgálat után a falpanelelemekből magmintát vettünk. A mintavételezés során ügyeltünk arra, hogy a mintákat a jellemző helyekről vegyük, ezért az alsó elemből, ami a legjobban károsodott, négy magmintát, a középső és az alsó elemből 2-2 mintát vettünk. A mintákat CT vizsgálatoknak vetettük alá. A vizsgálat alapján megállapíthatjuk, hogy a károsodás mértéke összefügg a meghatározott HU értékkel. A jobban károsodott részen egyértelműen csökkent a HU érték. Ezek alapján megállapítható, hogy abban az esetben is, ha a betonfelület levált a tűzterhelés, illetve a károsodás mértékét meg lehet határozni CT mérések segítségével.

Fontosnak tartottuk az egyes próbatestekben keletkezett porozitás változás és a repedésképek elemzését.

A póruseloszlás alapján jól látható (*18. ábra*), hogy az erőteljesen károsodott részeken a 100. szelet után a porozitás erőteljes növekedését figyelhetjük meg. A nem károsodott beton porozitás értéke 5% körüli lehetett ez a hőterhelés hatására 10% fölé emelkedett.



18. ábra: A falpanelelemből vett minta elemzése

4.2 Fagyállóság

A fagyállóság vizsgálat során 4 darab betonreceptjét fejlesztettünk:

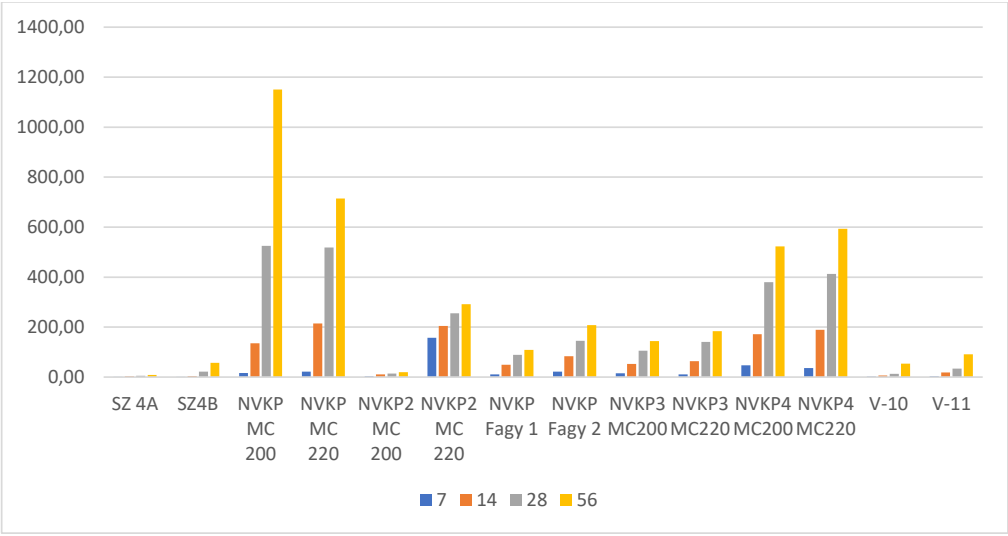
1) híd feszített tartó: C50/60-XC4-XF2-16-F5
2) vízelvezető elemek: C35/45-XC4-XF2-16-F5
3) burkoló elemek: C30/37-XK1-8-S1
4) terelő elemek: C40/50-XC4-XF2-15-F5

A *3. táblázat* a peremes fagyhámlásra vonatkozó követelményeket adja meg.

3. táblázat: A peremes fagyhámlásra vonatkozó követelmények

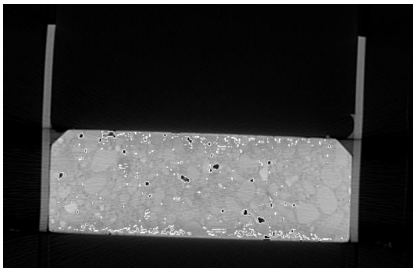
kitéti osztály	**XF1**	**XF2**	**XF3**	**XF4**
általgos érték g/cm^3	1500	1500	1000	1000
egyedi érték g/cm^3	2000	2000	1500	1500
általgos érték g	6,5	6,5	4,0	4,0
egyedi érték g	7,5	7,5	5,0	5,0

A mért érékeket a *19. ábra* tartalmazza. A mérések alapján minden keverék megfelelet a fagyállósági követelményeknek.

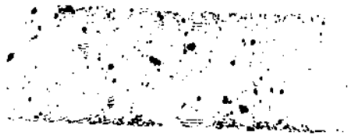


19. ábra: A fagyhámlás mért értékei

A CT mérések során a fagyasztás hatására a porozitás változást követtük nyomon. A mérések során a szeletekről készült felvételeken az adalékanyag és a pórus részt szegmentáltuk *(20. ábra)*, majd szeletenként ábrázoltuk a póruseloszlást (*21. ábra*). A *22. ábra* az összes mintára vonatkozó átlageloszlást adja meg.

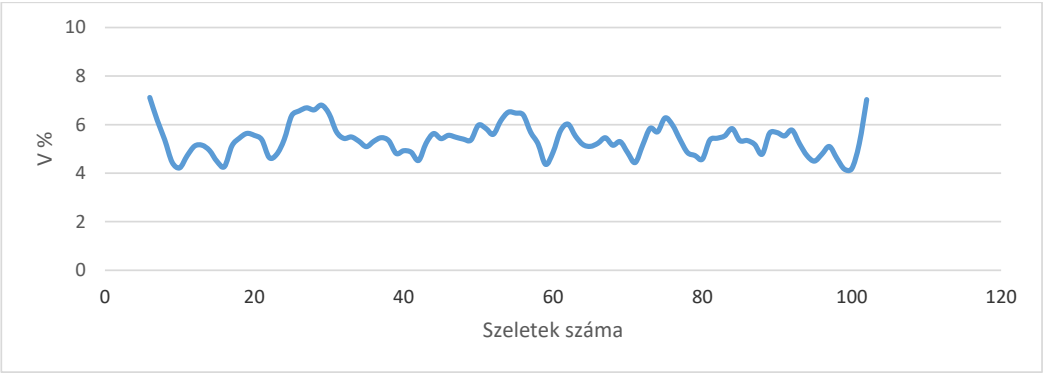


A betonról készült felvétel az adalékanyagok és a pórusok lehatárolásával

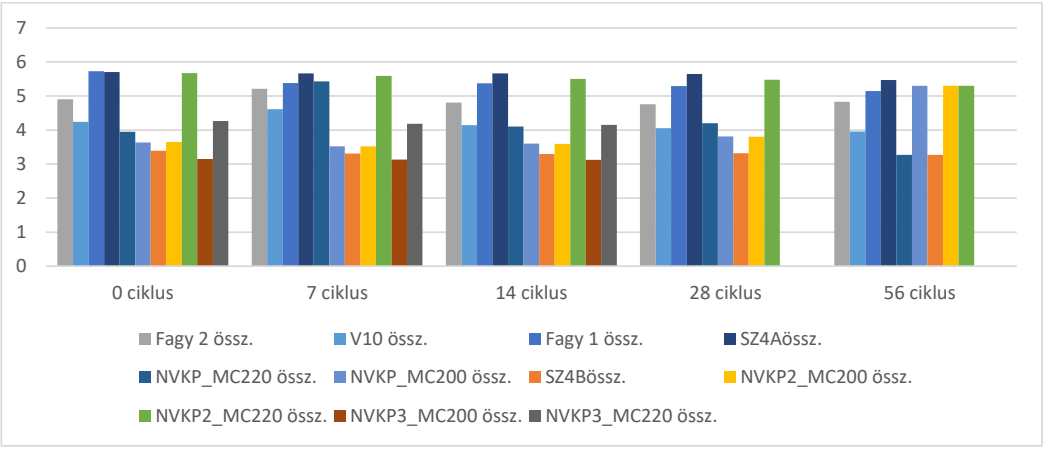


Pórusok lehatárolt felülete

20. ábra: A pórusok szegmentálása



21. ábra: A pórusok eloszlása a mintán belül



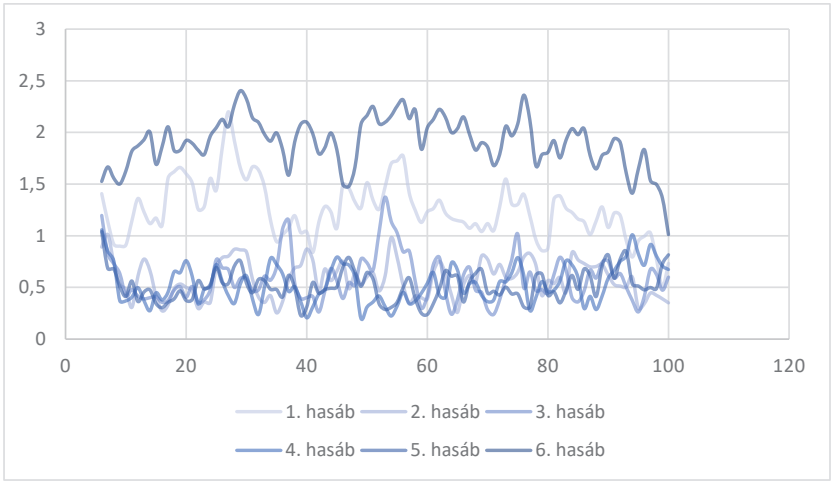
22. ábra: A porozitás változása a különböző keverékek esetén

Az eredmények (*19. ábra és 22. ábra*) alapján megállapíthatjuk, hogy a labormérések és CT mérések összhangban vannak egymással.

- az NVKP2_MC200 mérés esetén 56 ciklus után a porozitás jelentősen megnőtt és a CT mérések alapján is jelentősen megnőtt a porozitása.
- a V10 mérés esetén 56 ciklus után a porozitás jelentősen megnőtt és a CT mérések alapján is jelentősen megnőtt a porozitása.
- a többi keverék estén sem a leválás sem a CT-vel meghatározott porozitás értéke nem változott a fagyasztás hatására.

A kísérlet során a betonkeverékek a fagyhámlás vizsgálaton megfeleltek ezért a CT mérés során sem lehetett releváns különbséget kimutatni.

Tekintettel arra, hogy a minta felső és alsó része pórusokban feldúsult (*21. ábra*), ezért a mintát 6 részre osztottuk és úgy is vizsgáltuk a pórus eloszlás változását *(23. ábra)*. A *23. ábra* jól mutatja, hogy a felső, illetve az alsó részen a porozitás megnőtt ezért célszerű a minták szeletelése és az eredmények ilyen jellegű kiértékelése.



23. ábra: A pórusok eloszlása hasábonkénti bontásban

5 MEGÁLLAPÍTÁSOK

A CT orvosi diagnosztikai alkalmazása ma már széles körben elterjedt, azonban az anyagvizsgálatok területén alkalmazásuk még egyáltalán nem vagy kevésbé ismert. A CT a sűrűségkülönbségek mérésére szolgál, ezért azt kell megvizsgálnunk, hogy az anyagvizsgálatok mely területén elegendő a sűrűségkülönbség mérése, és mely tulajdonságok, illetve milyen anyagszerkezeti változások jellemezhetőek sűrűségkülönbség méréssel. Tekintettel arra, hogy az építőanyagok nagy része inhomogén, tehát található benne sűrűségkülönbség, ezért az anyagszerkezetük CT-vel jól vizsgálható. Továbbá az anyagszerkezeti leromlások során az anyagos sűrűsége, szerkezete lényegesen megváltozik ezért ezek a folyamatok is vizsgálhatók CT segítségével.

A kutatás során komoly kihívást jelent a CT felvételek kiértékelése, a CT felvételek zajossága miatt, a kiértékelés során képfeljavító eszközöket is alkalmaztunk. Ezek közé különböző szűrők (például átlagoló szűrő) tartoztak.

A minták kiértékelése alapján megállapíthatjuk, hogy a CT felvételek segítségével a tűzkárosodott és a fagy hatás során leromlott minták pórus szerkezet változása nyomon követhető és kimutatható.

A CT felvételek segítségével a pórusszerkezet változásának segítségével a tűzkárosodott minták esetén meg lehet állapítani a károsodás mértékét.
A fagy hatásnak kitett minták esetén a fagy károsodás folyamatát és mértékét lehet időben nyomon követni, hosszabb távon a CT felvételek segítségével felírható a leromlás mértéke.

A pórusrendszer háromdimenziós ismeretében a beton fagyállósága előre jelezhető, ezt a pályázat ezen kutatási része alátámasztja.

6 HÍVATKOZÁSOK

Balázs, L. Gy., Lublóy É. (2014): Possibilities of computed tomography (CT) for diagnosis of concrete structures In: D. Proceedings Choi, T. Tang (szerk.) 6th Int Conference of Asian Concrete Federation, 2014, pp. 34

Balázs, L. Gy., Lublóy, É., Földes, T. (2015) Let's look at inside by x-ray computed tomograph (CT), Stuctural Conctere Journal

BME (2012) Szakértői vélemény, 1000 mm átmérőjű SENTAB CSŐ, Csőtörés: 2012. júl. 1., Budapest XI. ker. Orlay utca 2. vizsgálati eredmények és a tönkremenetel lehetséges okai, Készítették: Balázs, L. Gy.

Lublóy, É., Ambrus, D., Kapitány, K., Barsi, Á. (2015): Air Void Distribution of Asphalts Determined by Computed Tomography, PERIODICA POLYTECHNICA-CIVIL ENGINEERING 59:(4) 2015, pp. 503-510

Lublóy É., Ambrus D., Kapitány K. (2014): Aszfalt összetétel vizsgálata CT-vel In: Köllő Gábor (szerk.) XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia., 2014, pp. 186-189.

Lublóy É., Balázs L. Gy., Kapitány K., Barsi Á., Földes T. (2014): Tűzkárosodott vasbetonszerkezet vizsgálhatósága CT-vel, VASBETONÉPÍTÉS 16:(4), 2014, pp. 86-90

Lublóy É., Földes T., Ambrus D., Kapitány K., Barsi Á. (2014): Útpályaszerkezetből vett fúrt magminták szemrevételezése és értékelése CT-vel, ÉPÍTŐANYAG 66:(3), 2014, pp. 64-67

MSZ EN 12697-6:2012 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 6. rész: Aszfalt próbatestek testsűrűségének meghatározása

MSZ EN 12697-5:2010 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 5. rész: A hézagmentes testsűrűség meghatározása

MSZ EN 12697-8:2003 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 8. rész: Aszfalt próbatestek hézagjellemzőinek meghatározása

MSZ CEN/TS 12390-9:2007 A megszilárdult beton vizsgálata. 9. rész: Fagyállóság. Lehámlás

Russ J. C. (2011), „Image Processing Handbook", Book, Sixth Edition, ISBN: 1-4398-4045-8, CRC Press

RÖNTGEN COMPUTER TOMOGRÁF VIZSGÁLATI LEHETŐSÉGEK ÉPÍTŐANYAGOKON

Földes Tamás
Tomogeo Kft
5000- Szolnok Madách u 26. t.foldes@t-online.hu

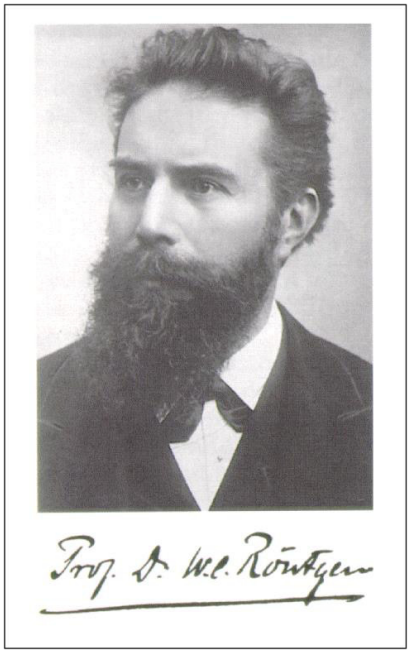
ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk ismerteti a CT és microCT mérés technikát és felhasználási lehetőségeit a természetes kőzetanyagok értékelésében, 20 éves saját eredmények alapján. Ezek a tapasztalatok jól felhasználhatók voltak az utóbbi 10 évben az építőanyagok hasonló jellegű vizsgálataiban. Ezek során született eredmények: *építőanyagok általános kvantitatív és kvalitív szerkezeti elemzése, porozitás értékelés, repedezett szerkezetek elemzése, mérési felbontás feletti pórusméret és alakelemzés, korróziós folyamatok hatásainak vizsgálata, összetétel szegmentációs vizsgálatok, klasszikus laborvizsgálati eredmények eltéréseinek magyarázata, faanyagok telítési és kezelési értékelései.*

1. BEVEZETÉS

1.1 A CT rendszerek kifejlesztése és fejlődése

A mellékelt ábrán röviden összefoglaltuk a röntgen computer tomográf rendszerek fejlődését napjainkig mely hosszú ideig szoros kapcsolatban állt az orvostudományi és humándiagnosztikai eszköz fejlesztésekkel (1. ábra).



A röntgen computer tomográfia (CT) története

1895 Röntgensugárzás felfedezése
1917 J.H. Radon: A radon transzformáció lehetővé teszi a kép rekonstrukcióját mérések alapján
1963 A.M. Cormack: technika az emberi test abszorpciós eloszlásának kiszámítására
G.N. Hounsfield and J. Ambrose: első klinikai alkalmazás
Feldcamp és társai kidolgozzák a microCT alkalmazást
1974 60 klinikai alkalmazás fejmérésekre
1975 első teljes test scanner
1979 Hounsfield és Cormack Nobel díjat kap
1989 Spiral CT bevezetése
1998 Multislice CT bevezetése
2007 Multislice CT két röntgencsővel (Siemens)
Napjainkig: Detektor rendszer és informatikai fejlesztések (a gépek mérete jelentősen csökken) és speciális ipari CT fejlesztések

1. ábra A röntgen computer tomográfia fejlesztésének története

1.2 A mérés elve

Spirál CT elve

A spirál CT-k központi részében a gantry-ban található a röntgencső (vagy 2 röntgencső) és a detektorok (több sorban - multislices rendszerekben) amelyek egymással szemben helyezkednek el. Az adatgyűjtés során többször nagy sebességgel 360 fokban körbefordulnak a gantryben a besugárzott objektum (emberi test vagy céltárgy stb) körül -amely tengely irányban eközben előrehalad.

Az adatfeldolgozás során kapott kép minősége sok tényezőtől függ. A megjelenített kép nem valódi leképezésből adódik, mint mondjuk a hagyományos röntgen felvételnél vagy a fényképezőgépekben, hanem villamos jelekből az adatfeldolgozó rendszer számítja ki.

A röntgen sugár, ahogy áthalad a különböző szöveteken, anyagokon, gyengül. A különböző sűrűségű anyagokban jobban, vagy kevésbbé elnyelődik. Az elnyelődés függ az adott anyag tulajdonságaitól. Az anyag sugárelnyelési képességét a sugárelnyelődési együtthatóval adhatjuk meg. Ha az energia közlés konstans, akkor a sugár elnyelődése kizárólag annak az anyagnak a tulajdonságaitól függ, amin áthalad. Ez a gyengített sugárzás éri el a CT-ben lévő detektorokat, amelyek a sugárzás intenzitásától függő villamos jeleket hoznak létre.

Az adatgyűjtés során, ahogy a csődetektor rendszer körbefordul a vizsgált tárgy körül, több száz vagy ezer mérést végez a rendszer, és a beérkezett adatokat mátrixba rendezi. Az adatgyűjtés végén az adatfeldolgozó rendszer (imager) kiszámítja a mátrix pontjainak az értékét, majd ezekhez az értékekhez - amelyek tulajdonképpen az adott pontok sugárelnyelési együtthatói - hozzárendel egy skálát. Ez az ún. Hounsfield skála. (Az értékeit Hounsfield egységeknek (Hounsfield Unit , HU) nevezzük. A mátrix különböző értékeihez a Hounsfield skála megfelelő értékeit hozzárendelve és ezt értékarányosan kiszínezve egy általunk definiált skála szerint megjeleníthetővé válik egy kép. A Hounsfield skála egy kalibrált skála ahol a vákuum értéke –1024 a víz pedig 0. (Megj: a feldolgozó szoftver ezt a skálát feltolja +1024 értékkel, vagyis ott a vákuum értéke nulla.) A legkorszerűbb multislices rendszerek tőbb detektorsort tartalmaznak egymás mellett, két röngencsövet tartalmaznak és nagysebességű térfogati mérést tudnak produkálni.

A micro-CT elve

A mikro-CT készük egy mikrofókuszált röntgencsőből, opcionálisan alkalmazható szűrőből, mozgatható mintatartóból és egy detektor-mátrixból épül fel. (Stock 2009 A mikrofókuszált röntgenforrás átvilágítja a mért mintát, a röntgennyalábot alkotó fotonok kölcsönhatnak a minta anyagával (elnyelődnek, szóródnak), miáltal gyengül a nyaláb, azaz csökken az intenzitása. A nyaláb intenzitásgyengülése a mintában található atomok rendszámától és az anyag sűrűségétől függ. A detektor-mátrix meghatározza a mintán áthaladt röntgennyaláb intenzitás-eloszlását, mely tartalmazza a minta nagyított projekciós képét. A minta forgása (a mikro-CT esetén a minta forog, a detektor és a röntgenforrás rögzített!) közben több száz projekciós kép készül, melyből egy számítógépes algoritmus rekonstruálja a minta virtuális metszeteit. Cone- beam geometria esetén, amikor a nyaláb vertikális irányban is divergens, legelterjedtebben az ún. Feldkamp algoritmust használják a rekonstrukcióhoz (Feldkamp és mtsai 1984), amely az FBP-nek (Filtered Backprojection, szűrt visszavetítéses rekonstrukció) a cone-beam geometriához adaptált változata.

1.3 A CT mérések típusai

Alapmérések

A CT alapmérés során lehetőségünk van arra, hogy a kőzetanyagot nagy felbontásban (.1 x .1 x 1 mm-es nagyságrendben) lemérjük és a kapott 3D-s Hounsfield érték eloszlás és kép alapján nagy részletességgel kiértékeljük. A mérés akkor is elvégezhető, ha a kőzetanyag laza széteső volta miatt „műanyag vagy alumínium védő tok”-ban van.

Feltöltéses – felszívásos mérések

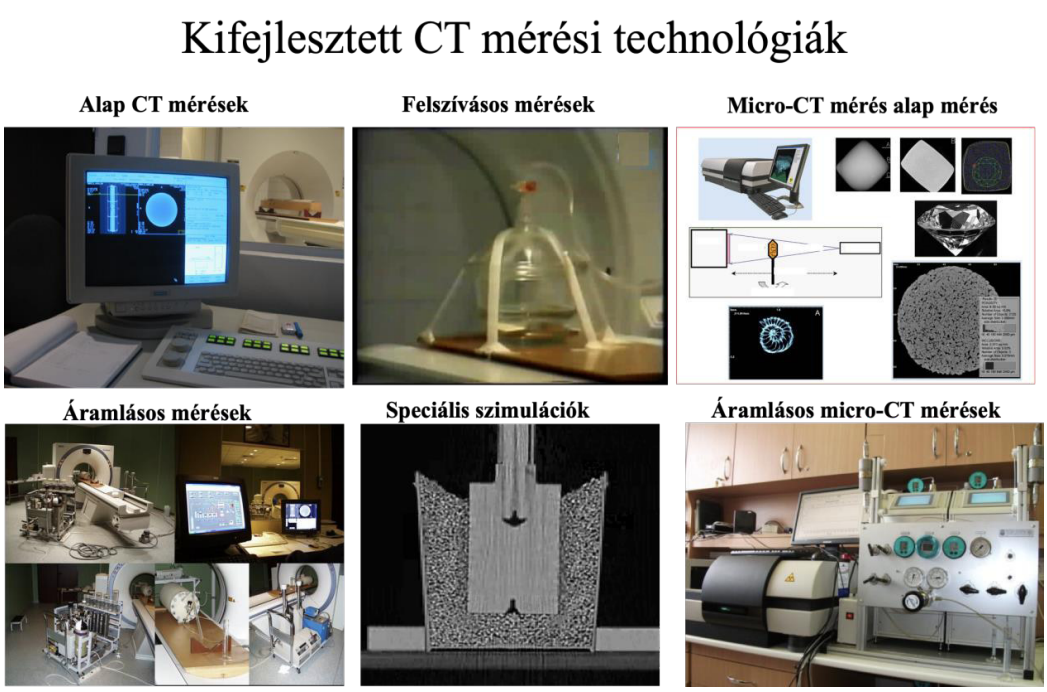
Ezen mérési technológia során azonos pozíciójú megismételt alapméréseket végzünk a kivákuumozott mintán, felszívás közben és a telített mintán.

Áramlásos mérések

Az áramlásos CT mérés során az előzetesen erre megfelelően előkészített mintán valamilyen feltöltő folyadékot (víz, olaj, iszap, sav stb.) vagy gázt áramoltatunk és közben CT mérést végzünk. A berendezéssel a nyomást, a hőmérsékletet és az átáramló mennyiséget is rögzíteni lehet a CT méréssel pedig az időben lezajló telítettséget lehet 3D-ben térképezni.

Analóg speciális szimulációs mérések

Ezek általában speciális célberendezéseket alkalmazó mérések melyek a fenti három mérés kombinációját alkalmazzák.



2. ábra Kifejlesztett CT mérési technológiák

1.4 A CT mérések alkalmazása során felmerülő leggyakoribb problémák

Mérési zaj – kalibrációk: alacsony mérési zajt eredményező kalibrációkat kell alkalmazni

- Minta méret: a vizsgálandó anyagok átlagsűrűségétől függően különböző méretű anyagok mérése végezhető el
- Minta geometria: A CT mérőrendszere hengerszimmetrikus, az éles sarkok, kiálló nagy sűrűségű élek hibákat eredményeznek a képben
- Fémtartalom: A fémes csomók kisebb térfogatban is megváltoztatják a képmátrix H.U. értékeit és ez helytelen értékeléshez vezet
- Idő management: Az áramlásos méréseknél – mivel nem folyamatos a CT mérés, pontos tervezést kell végezni ill. mérés közben egyéb kontroll méréseket kell végezni
- Optimális SCAN szám: Előzetes tervezést kell végezni a méréseknél az optimális SCAN szám meghatározására.
- S zéria határok: Hosszú- pl. 1 m-es méréseknél a vizsgálandó anyagok határai és a széria határok nem esnek egybe, e miatt az adott rész feldolgozása egyben nem végezhető el.

2. ÉRTÉKELÉSI ALAPOK

A CT vizsgálatok segítségével a vizsgálati anyagokat az eredeti állapotukban (akár egy zárt tokban), roncsolás mentesen lehet megvizsgálni. A vizsgálatok során lehetőségünk van arra is, hogy dinamikus (időben változó) rendszereket is tanulmányozzunk és így a különböző paramétereiket meghatározzuk. A röntgen sugárzás gyengülését és az abszorpcióját valamint a Hounsfield értéket az alábbi összefüggések határozzák meg.

A röntgen sugárzás gyengülése

$$\mathbf{I=I_0 \times e^{-\mu x d}}$$

ahol

I a kimenő intenzitás,
I_0 a beeső rtg sugárzás intenzitása,
μ a linearis sugárgyengítési együttható, az anyagra jellemző,
d az anyagvastagság.

A röntgen sugárzás abszorpciója

$$\mathbf{A \sim \lambda^3 Z^4 dD}$$

ahol

A az abszorpció,
λ a hullámhossz (a kisebb energiájú sugárzások jobban elnyelődnek),
Z a rendszám, (a negyedik hatvánnyal arányos az abszorpció),
d a sűrűség,
D a rétegvastagság.

A Hounsfield érték és skála:

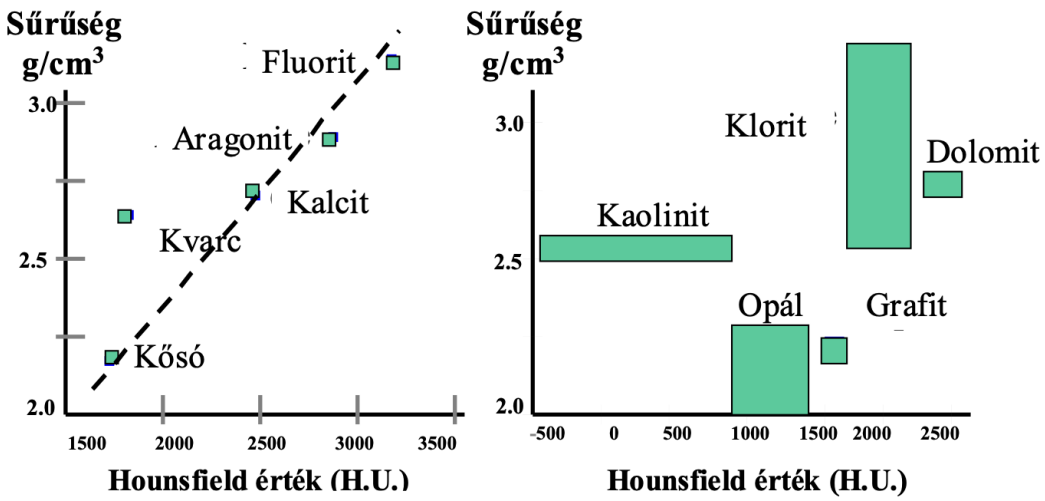
$$HU = \frac{K(\mu - \mu_{víz})}{\mu_{víz}}$$

HU a Hounsfield egység (Hounsfield Unit),
K konstans, értéke 1000,
μ az adott képpont sugárgyengítési együtthatója,
$\mu_{víz}$ a víz sugárgyengítési együtthatója.

A skála értékeit a CT kifejlesztőjének tiszteletére nevezték el Hounsfield Unit-nak, amit HU-nak jelölünk. A skála fix pontjai a víz értéke, ami 0, és a levegő értéke, ami -1000. A pozitív oldalon 3000-ig tart a skála számozása. A modern készülékeken lehetőség van a skála kiterjesztésére. A fentiek alapján a mérési volumenben a Hounsfield értéket elsősorban az anyagsűrűség (a komponensek sűrűsége és az üres terek térfogata) befolyásolja.

Fontos tényező még az értékelésben a vizsgálandó tárgy vastagsága és a különböző kalib-rációk mellett kialakuló mérési zaj mértéke is. A különböző ásványok Hounsfield értékeire megállapíthatjuk, hogy a Hounsfield érték és a valódi sűrűség értékek között közel lineáris kapcsolat van (3. ábra).

A különböző ásványok sűrűség és Hounsfield érték adatainak összehasonlítása



3. ábra A különböző ásványok és a Hounsfield adatainak összehasonlítása

Mindezek alapján a CT mérési adatmátrixból „vizualizált" kép első közelítésben úgy kezelhető mint egy a szeletfelbontásának megfelelő sűrűségtérkép a kőzetről. Ezen a sűrűség képen jól kirajzolódnak a kőzet különböző sajátosságai (szemcsézettség, repedezettség, szedimentológiai jegyek, kőzettani változások stb.) A szeletek egymás utáni lejátszásával feltárul előttünk a vizsgált anyag belsejének jellegzetességei.

Az egyes cellák Hounsfield értékeit a fentiek szerint két tényező befolyásolja. Az egyik a cellára eső ásványszemcse (ill. szemcsék) Hounsfield értéke ill. a cellára eső pórustérben a folyadék és/vagy gáz (levegő) Hounsfield értéke. Ha a kőzetet megfelelően előkészítettük kiürítettük,

kivákuumoztuk és ezután folyadékkal telítjük, CT mérés közben a cellákra eső effektív (az adott folyadékkal vagy gázzal telíthető) szabad térfogat – azaz a cellákra eső effektív porozitás – meghatározható. Mivel a feltöltés során a cellák feltöltődése az időben követhető, azok belső szerkezetére (bonyolultságára) is következtetni tudunk. Ha a kőzet cellára eső effektív porozitás értéke ismert, akkor ismertté válik a cellára eső ásványszemcsére ill. szemcsékre jutó Hounsfield érték is. Ennek alapján, ha az anyag durva kristályos (meghaladja a mérési cella méretét) akkor számítható, ha ennél kisebb méretű akkor pedig becsülhető az ásványos összetétel is.

További „manipulációkat" végezhetünk különböző folyadékokkal, savakkal, gélekkel olyan módon, hogy az azonos pozíciókban elvégzett méréseinket többször megismételhetjük mellyel a kőzetünk összetételére, kőzetfizikai sajátságaira, a savazó és egyéb anyagok kölcsönhatásaira tudunk következtetni.

3. ÉRTÉKELÉSI EREDMÉNYEK KŐZETANYAGOKON

Az értékelési lehetőségek és a mérés típusok kapcsolatát mutatja-természetes kőzetanyagokra vonatkozóan a 4. ábra:

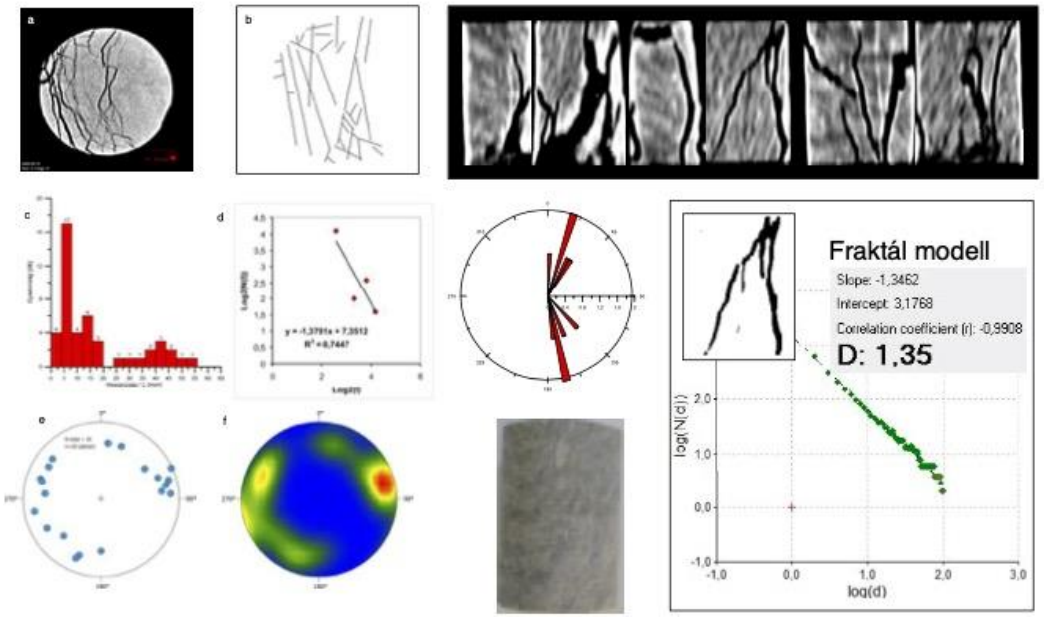
ÉRTELMEZÉSEK, FELDOLGOZÁSOK	Mérés típus			
	Alap	Feltöltéses	Kiszorításos	Analóg
Szerkezeti -geometriai sűrűség heterogenitás értelmezés, feldolgozás				
-a mintadarabok mechanikai sérülései (elméleti/tényleges magtérfogat)	■			
-szerkezeti és/vagy rétegfelületek dőlés eloszlása mélység szerint (szög,irány)	■			
-repedések eloszlása vastagság, hossza, orientáció és fraktál dimenzió meghatározása	■	■		
-egyes alkotórészek geometriai értékelése (üregek, kavicsok, intraklasztok stb)	■			
-szemcseeloszlás vizsgálat	■	■		
-2D képfeldolgozások: köpenykép, a magtengelyével párhuzamos metszetek stb.	■			
-a fontosabb szerkezeti elemek 3D-s vizualizációja egyeztetett irány szerint	■			
Litológiai - sűrűség heterogenitás értelmezés, feldolgozás				
-a litológiai összetevők térfogatszázaléka a 3D-s H.U. kumulatív eloszlása alapján	■	■		
-ásványos összetétel becslés (felbontástól és kőzetanyagtól függ)	■	■		
-belső vertikális üledékfelhalmozódási ciklusok a H.U. értékek autokorrelációs elemzésével	■			
-horizontális heterogenitás vizsgálat (a magtengelyére merőleges szeletek anizotrópia ellipszise)	■			
-a fontosabb litológiai egységek sűrűség eloszlása	■			
-a fontosabb litológiai elemek 3D-s vizualizációja egyeztetett irány szerint	■			
Kőzetfizikai - sűrűség heterogenitás értelmezés, feldolgozás				
-a feltöltő folyadékra vonatkozó telítettség - CT porozitás átlag és 2D-3D-s eloszlások		■	■	
-felszívási profil (a telítettség változása az időben) egyeztetett felszíneken ill. alkatelemeken.		■		
-a felszívásra vonatkozó effektív térfogat ill. térfogatok egyeztetett felszíneken ill. alkatelemeken.		■		
-kiszorítási profil (a telítettség változása az időben - relatív permeabilitás méréshez)			■	
-a kiszorításra vonatkozó effektív térfogat ill. térfogatok egyeztetett felszíneken ill. alkatelemeken. (relatív permeabilitás méréshez)			■	
-kiszorítási fázis és fázistérfogat (relatív permeabilitás méréshez)			■	
-az effektív térfogat 3D vizualizációja		■	■	
-a magdarab fúróiszap tartalmának becslése		■	■	
-homokolás vizsgálat			■	
-stresszvizsgálatok			■	
Analóg feldolgozások				
Modellkísérletek CT alatt				■

4. ábra A különböző kőzetanyag mintákon elvégezhető értékelések és a CT mérés típusok kapcsolata

A fenti táblázat jól mutatja, hogy bonyolult értékeléseket lehet végezni a különböző mérés típusok kombinált alkalmazásával.

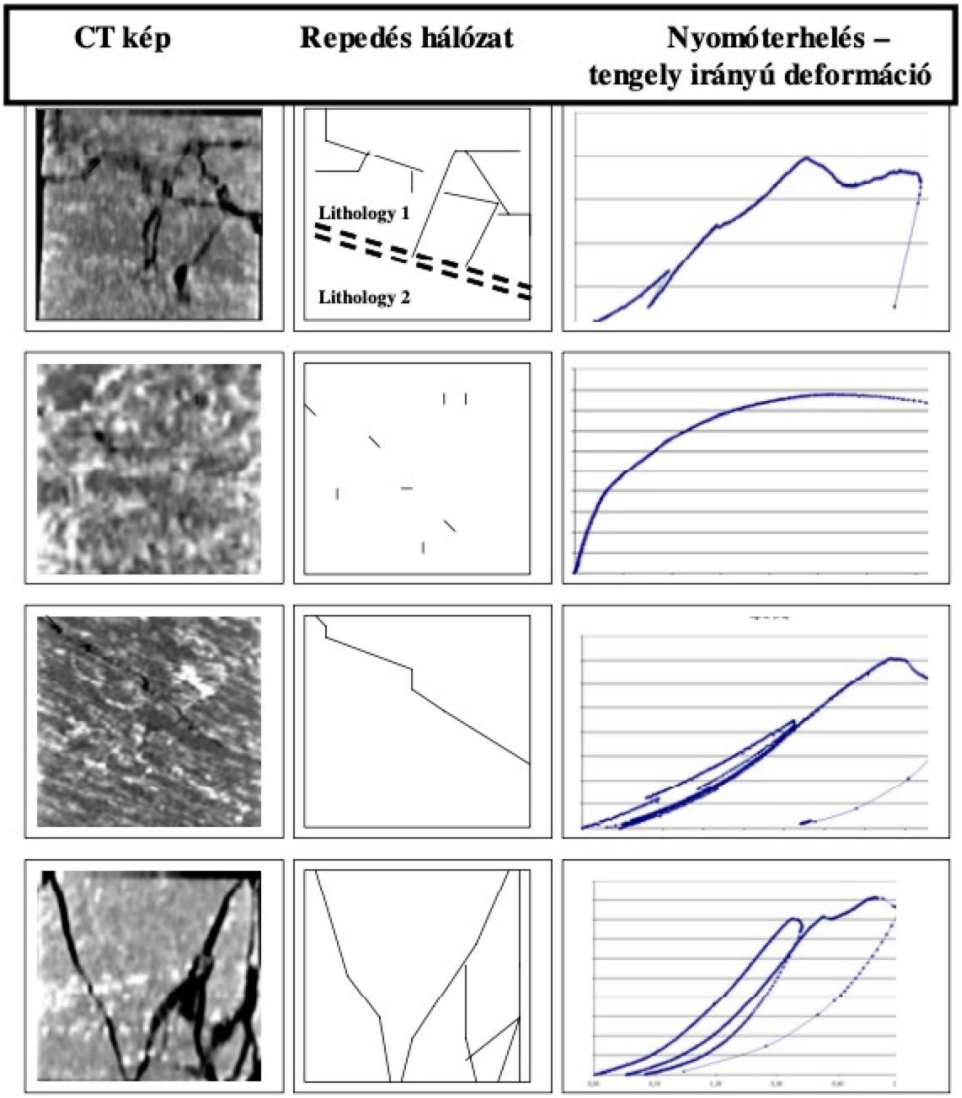
A szerkezeti értékelésekben a CT mérések jelentős hozadéka, hogy az értelmezéseket a minta teljes (nem csak felszíni) térfogatában lehet elvégezni, amely így pontosabb ill. megbízhatóbb és sokszor alapvetően más eredményt szolgáltat, mint egy 3D felületen (borehole image vagy felszíni magfotó) eredmény. A mérés rendkívül érzékeny a sűrűség változásokra így különösen jól használható a repedezett (nyitott repedéseket is tartalmazó vagy üreges) kőzetek vizsgálatában és a különböző kőzetmechanikai vizsgálatokban generált törésrendszerek értékelésében.

A repedezett kőzetek vizsgálatában is kombinált (alap + feltöltéses esetleg kiszorításos – áramlásos méréseket kell alkalmazni, hogy az összes fontosabb paramétert meghatározzuk. Korlátot jelent a mérések felbontása, amely maximálisan 100 micron-t nem haladja meg. Ezért egyes paramétereket (pl: repedésvastagság) az adott repedésre eső és a feltöltéses mérésekből számított telítettség-porozitás érték figyelembe-vételével lehet számítani ill. becsülni. Egyes minták esetében érdemes kiegészítő méréseket végezni microCT-vel melynek felbontása eléri a micronos nagyságrendet, de a méréshez felhasználható minták mérete kisebb.



5. ábra Különböző repedés értékelések CT mérések eredményeinek kiértékelése alapján

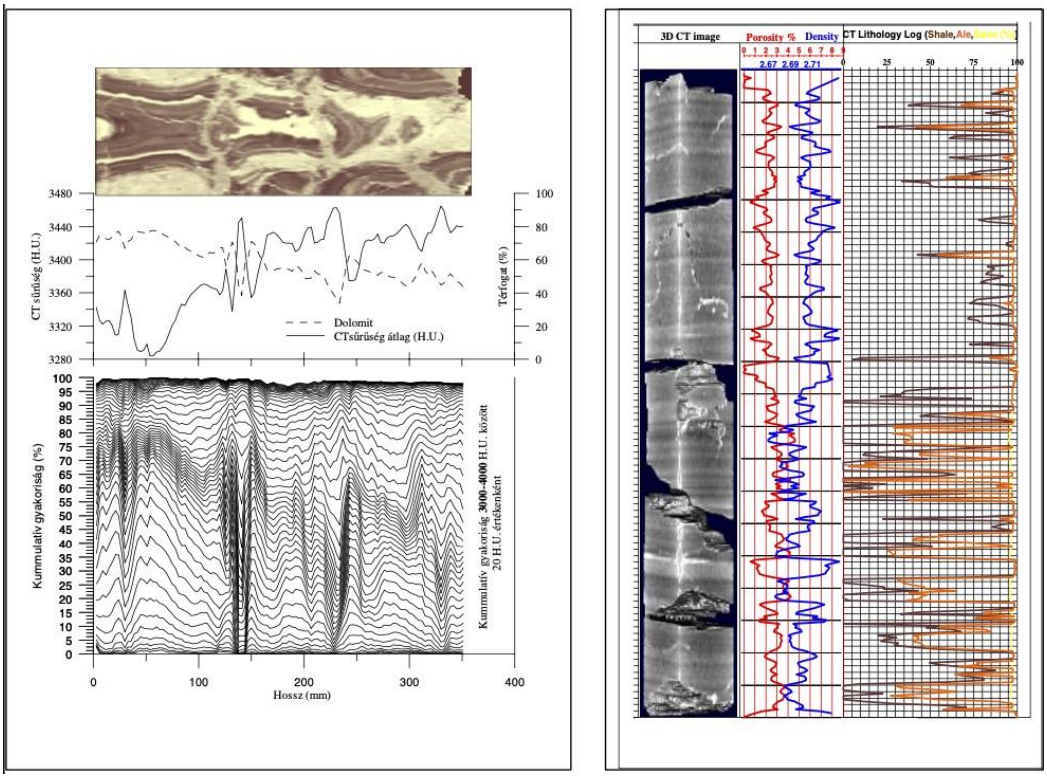
Magyarországon még nem megoldott a kőzetmechanikai vizsgálatok (törés-tesztek) alatti in situ non destruktív módszerekkel történő és a repedések kialakulását térké-pező és paraméterező módszerek alkalmazása. Egyik áthidaló lehetőség a minták -a törés-vizsgálat előtti és utáni- CT adatainak-képeinek összehasonlítása és értékelése mely fontos információkat szolgáltathat az egyes kőzetekben kialakuló tipikus repedéshálózatok és ezek paramétereinek feltérképezésében (M Tóth, Vásárhelyi, Ván, Kiss, Földes et al) (6. *ábra*).



6. ábra Törésteszt vizsgálatok CT méréssel

A kőzetösszetétel vizsgálatok a CT vizsgálatokhoz kapcsolódó értékelések egyik legproblematikusabb része. Ennek az az oka, hogy a kőzetalkotó ásványok mérete általában a CT mérés felbontása alatt van, így egy adott mérési voxel több ásványszemcsét és a köztük lévő folyadékkal vagy gázzal kitöltött térfogatot is tartalmazza. Az adott voxelre kapott H.U. érték ezek súlyozott átlaga. Ez az úgynevezett parciális volumen effektus a kőzetek esetén. A másik hatás pedig az úgynevezett tömeghatás, ami a nagyméretű a voxel méretét jelentősen meghaladó – méretű ásványszemcsék térfogatán kapott H.U. eloszlásából adódik. Ezenkívül jelentősen befolyásolhatja a H.U. eloszlásokból készített kőzetösszetétel térképezést a fémtartalmú ásványszemcsék (pl: pirit) eloszlása amely a valós térfogatszázalékuknál általában nagyobb súlyú sűrűség eltolódást eredményez az eloszlásokban.

Ásványos összetétel vizsgálatokat ezért csak a durvakristályos (pl: gránitok egyes típusai) kőzeteken ill. viszonylag stabil összetételű üledékes kőzeteken (karbonátos vagy nem karbonátos agyagos-aleuritos-homokos sorozatok, üledékes kőzetei) vagy alacsony számú ásványi komponenst tartalmazó kőzeteken-zárványokon (Hidas K, Szabó Cs, Földes et al) lehet általában megbízhatóan elvégezni a kiegészítő felszívásos – porozitás kalibrációs vizsgálatokkal eredményeinek figyelembevételével. Ezen számítások a H.U. 3D kummulativ eloszlások alapján készíthetők el, ahol az egyes cut-off intervallum határok kijelölik a komponensek térfogat százalékát (7. *ábra*).



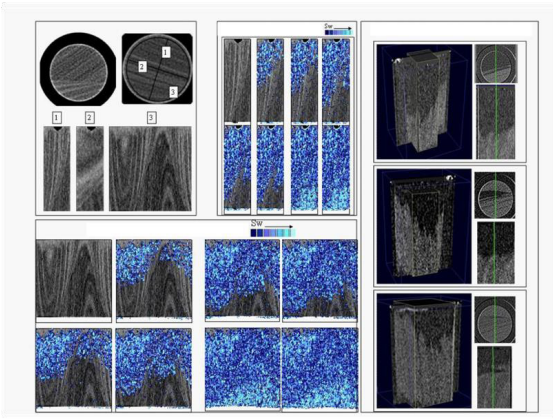
7. ábra CT mérés kiértékelés alapján készített kőzetösszetétel számítások néhány példája

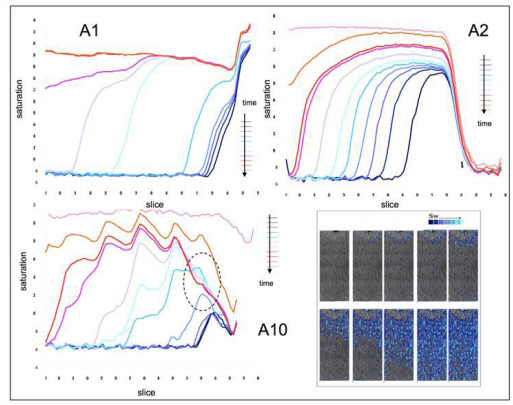
A kőzetfizikai karakterizáció a CT vizsgálatok értékelésének legértékesebb fejezete. A vizsgálatok célja általában a kőzet hidrodinamikai működésének és kőzetfizikai heterogenitásának térképezése a minta teljes térfogatában.

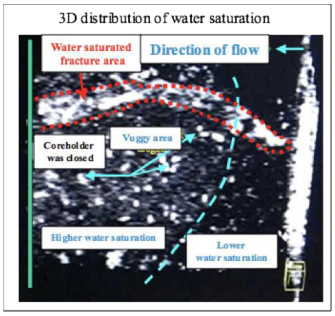
A legfontosabb és jelenleg egyedül a CT mérésből meghatározható paraméterek, számítások a mintatestet érintő mérési (H.U.) adatvoxelek térfogatában azaz a mintán belül 3D eloszlásban: effektív (a feltöltő folyadékra vonatkozó) porozitás, effektív térfogat %, felszívási profil (telítettség változás eloszlása a feltöltés alatt), telítettség % ill telítettség eloszlás több fázis esetén., fázis térképezés az időben, relatív permeabilitás értékelés (a kiszorító berendezés által szolgáltatott adatok kalibrációja mellett)

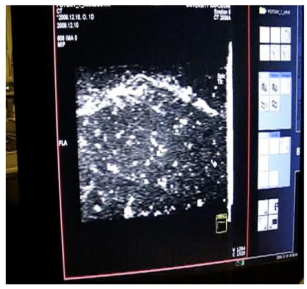
A legbonyolultabb vizsgálatok a több fázisú a rezervoár rétegnyomásán és hőmérsékletén végrehajtott különböző kiszorításos vizsgálatok melyeknek egyik példája a kimerült olajtelepek

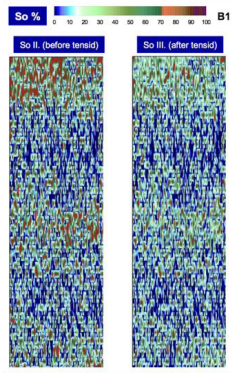
réteg-serkentését (azaz a maradék kőolaj kihozatalát –EOR) segítő különböző serkentő anyagok tesztelését szolgáló kísérletek. A mérés és értékelés során a kezdeti vízfeltöltés folyamata általában jól tanulmányozható volt. Jól megfigyelhető a heterogén mintákban a vízujjak kialakulása a nagyobb porozitású laminákban ill. egyes mintákban a kialakult alacsony permeabilitású gátak és ezzel a telítettség növekedése ill. időbeli visszaesése ezek környezetében. A mellékelt ábrák jól szemléltetik, hogy a vízfront alakulást a minták belső kőzetfizikai heterogenitása alapvetően befolyásolja (8. ábra).

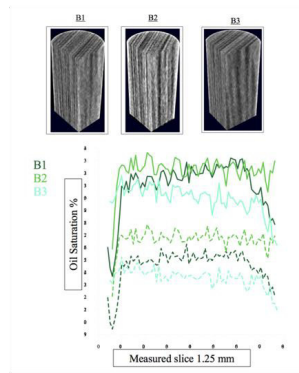












8. ábra CT mérés kiértékelés alapján készített kiszorítás vizsgálati számítások néhány példája

4. ÉRTÉKELÉSI EREDMÉNYEK ÉPÍTŐANYAGOKON

4.1. Az építőanyagok néhány sajátossága a CT mérések és értékelések vonatkozásában

A beton és egyéb az építőiparban használt anyagok nagy része (kivéve a természetes eredetű építésre használt anyagokat) gyártás termékek és így a gyártás során előálló információkkal és laboratóriumi adatokkal rendelkezhetünk a mintákra vonatkozólag. Ezek fontos tényezők lehetnek a CT mérési technológiára ill az eredmények értelmezési irányára vonatkozólag.

Ugyanakkor pl a betonokban használt adalékanyagok egy része (pl kavicsok) természetes eredetűek az összetétel vizsgálatuk a kőzetvizsgálatokhoz (pl:konglomerátumok stb) hasonlatosak.

A kőzetfizikai tulajdonságaik sajátossága, hogy jelentős részük nagy totál és kis effektív (építőiparban ezt nevezik látszólagos porozitásnak) porozitást tartalmaz. Gyakran tartalmaznak relatíve nagy méretű (de zárt) pórusokat. Így összességében a feltöltéses és áramlásos CT vizsgálati mérések felhasználási lehetősége korlátozott.

Nagy jelentősége van ugyanakkor az adalékanyagok alakjának mivel a pórusok-belső repedések egyrésze az adalékanyagok felületéhez kötődik - a kavics tartalmú természetes kőzetekhez hasonlóan.

Ugyanakkor nagy a jelentősége az alapméréseken nyugvó szerkezeti értékeléseknek ill. a korróziós kontroll vizsgálatoknak -a CT mérési adat nagy sűrűség érzékenysége miatt.

Ha az adalék és a habarcs összetétel stabil eloszlású a CT mérési H.U. adatot elsősorban a porozitás fogja befolyásolni. Így 3D-ben ismertté váló H.U. adat eloszlás segíthet a beton anyag tulajdonságainak megismerésében.

Speciális problémát jelenthetnek a nehezített (hematittal, ólommal-söréttel) beton vizsgálatok melyek csak nagy energiájú berendezésekkel vizsgálhatók.

Az előzetes mérési és értékelési és a szakirodalmi tapasztalatok alapján az alábbi területeken születtek kiemelhető eredmények:

- építőanyagok általános kvantitatív és kvalitív szerkezeti elemzése -porozitás értékelés,
- repedéses szerkezetek elemzése,
- mérési felbontás feletti pórusméret és alakelemzés -adalékanyagok alak és minőség elemzése,
- korróziós folyamatok (mállás, pH érték változás) hatásainak vizsgálata,
- összetétel szegmentációs vizsgálatok (pl: útminták),
- sűrűség és heterogenitás vizsgálatok,
- klasszikus laborvizsgálati eredmények eltéréseinek magyarázata,
- anyagok telítési és kezelési vizsgálatai.

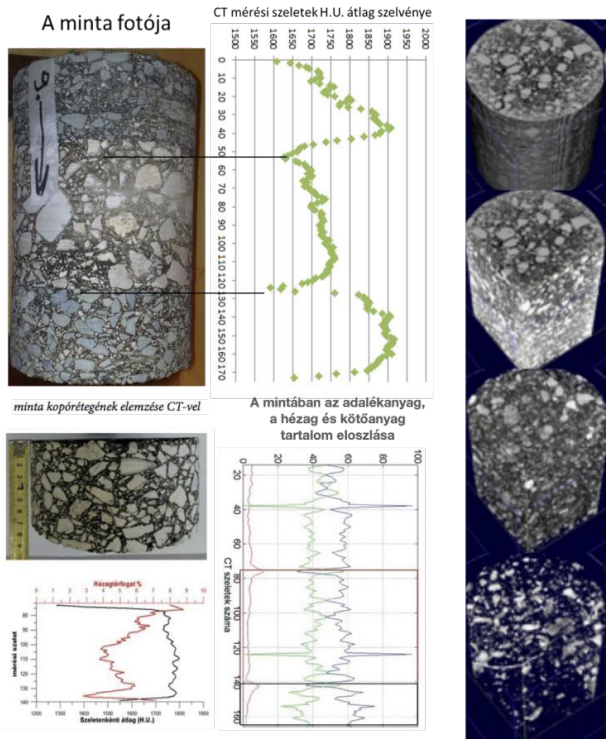
4.2. Építőanyag minta CT vizsgálatok és értékelések

A következő vizsgálatokban vettünk részt túlnyomórészt a BME tanszékei (Építőanyag, Útépítési és Geotechnikai tanszékei) és más iparvállalatok részvételével ill. közös kutatási programjában ill. megrendelésre.

4.2.1. Útépítési (aszfalt) minták vizsgálatai ((9, 10) alapján)

A CT segítségével meghatározható vált a rétegeken belüli adalékanyag szemeloszlás, ami laboratóriumi vizsgálatokkal nem lehet meghatározni. Mindezek mellett károsodott (repedezett, nyomvályús) szerkezetek vizsgálata is lehetővé válik, amit a laboratóriumi vizsgálatokkal nem lehetett volna elvégezni. A károsodás mértéke is meghatározható lesz, így javításuk is egyszerűbbé válik. A CT által előállított 3 dimenziós képet digitális formája miatt a végeselemes modellezésekhez is használhatjuk, ami segítségével az útpályaszerkezet teherbírása becsülhető, számítható lehet.

A felvételeken a különböző sűrűségű anyagok szétválaszthatók és szegmentálthatók. Aszfalt minta esetén a hézagtartalom eloszlás alapján a réteghatárok is egyértelműen beazonosíthatóak ((9) és (10) alapján) mivel a réteghatároknál a hézagtartalom jelentősen megnő. Ennek oka, hogy a burkolat készítésekor hideg aszfalt felületre meleg réteget visznek fel, és az összedolgozás során a két réteg között egy nagy hézagtartamú rész keletkezik (9. ábra)



9. ábra Útminta értékelések példája CT mérés kiértekelése alapján

4.2.2. Szálerősített beton vizsgálata (BME teszt vizsgálat alapján)

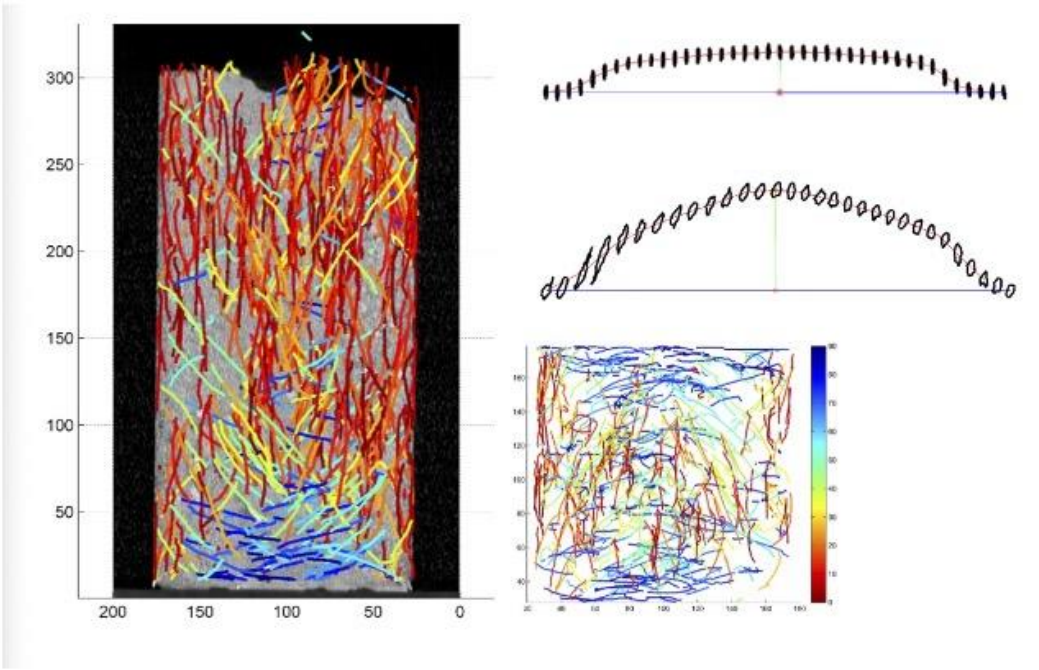
A CT felvételek alapján a következőket lehetett meghatározni:

Száltartalom változtatásának nem volt jelentős hatása a szálelhelyezkedésben. A szálak betonban való hosszabb keverési ideje egyenletesebb széleloszlást eredményezett, azonban nem szüntette meg teljesen a lokális szálfeldúsulásokat.

A szálak irányultságát jelentősen befolyásolta a betonba adagolt szál mennyisége. A nagyobb (0.5V%) száltartalom esetén a szálak már rétegesen irányítottá váltak.

Vizsgálatok során ki lett mutatva, hogy 150×150×600 mm élhosszúságú próbatestek zsaluzott oldalain a szálak a zsaluzat irányába rendeződtek, míg a próbatest közepén véletlen irányultságúak voltak.

A szálirányultságra nem volt jelentős hatása a keverési idő változtatásának. Azonban jelentős hatása volt a bedolgozásban, illetve tömörítésben végzett kisebb változtatásoknak.
Kimutatták, hogy az acél szálak egy része a betonban való keverés hatására deformálódhat. A



deformáció mértéke és gyakorisága csak kis mértékben növekedett a hosszabb (5 perc helyett 30 perc) keverés hatására (10. ábra).

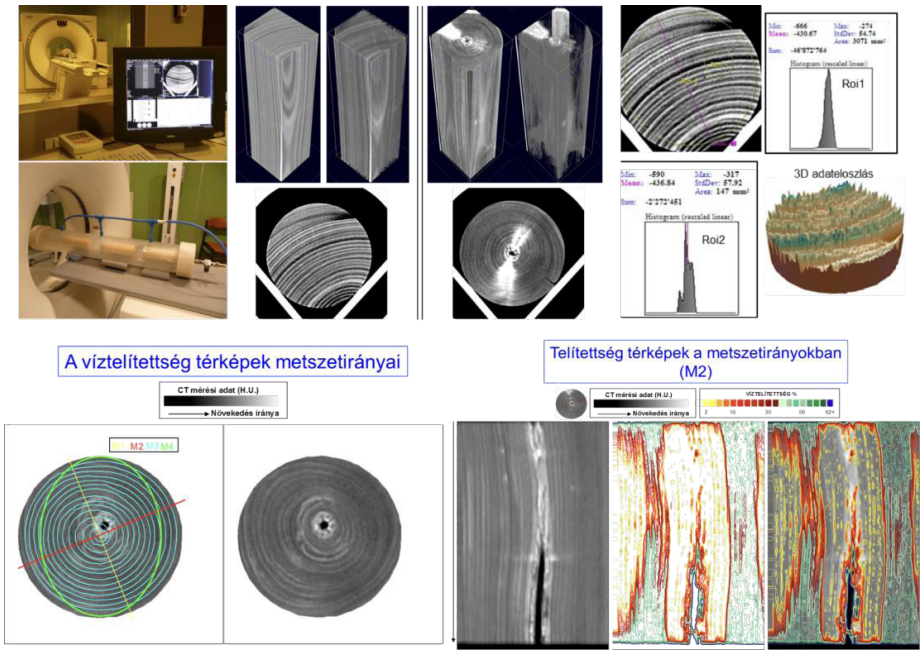
10. ábra Szál eloszlás betonmintában

4.2.3. Faanyag vizsgálatok CT-vel (13 Hivatkozás alapján)

A fa fontos építőipari anyag és felhasználása széleskörűvé vált a különböző fakezelési eljárásokkal melyek megváltoztatják kedvező irányban az egyes tulajdonságait. A CT (és MR)

vizsgálatokkal (alap és feltöltéses mérések, kísérleti szimulációk) a fa anyagok tulajdonságai (pl. porozitás) jól tanulmányozható a telítési folyamatokkal együtt (11. ábra).

- az alkalmazott módszer az álgeszt jelenlétét kimutatja,
  - az álgesztesedés határa éles, jól kivehető, megegyezik a valós képpel,
  - a törzsszelet teljes területéről egységesen jó minőségű információt kapunk,
  - az álgeszt megléte könnyen felismerhető, a kiértékeléshez nem szükséges hosszas kiértékelési gyakorlat,
  - kiváló lehetőséget biztosít az évgyűrűszerkezet vizsgálatához is.
- a kapott mérési adatokból lehetőség van bármilyen irányú telítettségi metszet készítésére.
  - meghatározható a 3D effektív porozitás eloszlás.
  - modellezhető válik a kiszorítási folyamat is.



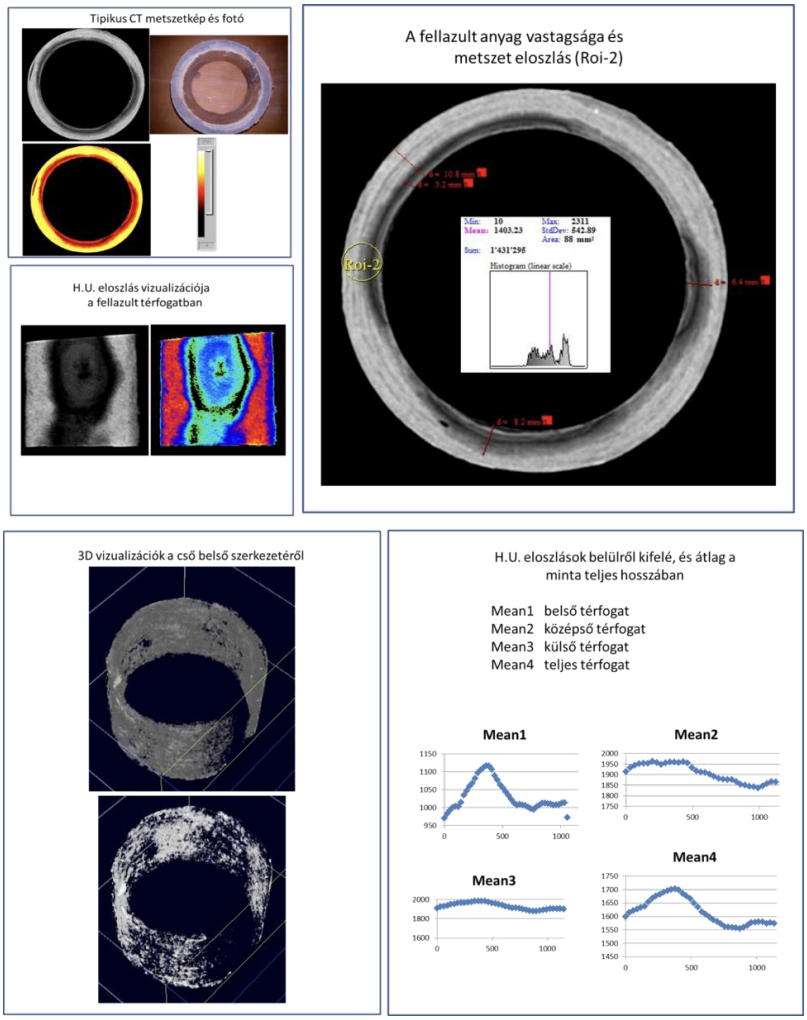
11. ábra Faanyag értékelése feltöltéses CT vizsgálattal

4.2.4. Károsodott építőanyagok vizsgálatai

Károsodott azbesztcement cső vizsgálata (BME teszt vizsgálat)

CT felvételen a károsodott helyen a cső teherbíró részének elvékonyodása tapasztalható. A CT felvétel élességének módosítás után a levált felület jól elkülöníthető a CT képeken, úgy ahogy a metszetről készült fényképfelvételen is. a képen a világosabb színek a magasabb Hounsfield értékű (sűrűségű) területeket adják meg, a sötétebb részek pedig az alacsonyabb sűrűségű részeket. A sűrűség csökkenésből mindig valamilyen anyagszerkezeti leromlásra következtethetünk és így a károsodott rész környezetét is láthatjuk. Jól látszik, hogy a károsodott részek H.U. értéke jelentősen csökkent, ami azt jelenti, hogy az anyag sűrűség is jelentősen csökkent. A sűrűségcsökkenés nem egyenletesen következik be, hanem rétegesen,

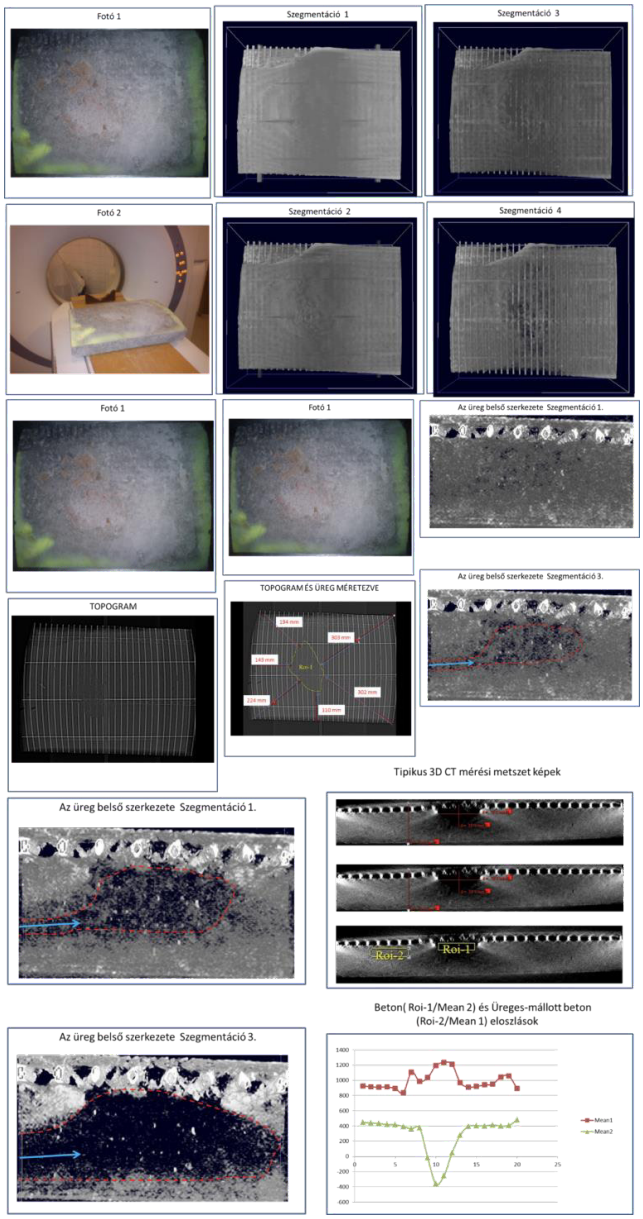
ez a réteges sűrűség csökkenés magyarázza azt a tényt, hogy más roncsolásmentes vizsgálat elég nehezen kivitelezhető (12. ábra).



12. ábra Károsodott azbesztcementcső kiértékelése CT vizsgálattal

Erodálódott SENTAB feszített vasbeton cső vizsgálata ((6) Hivatkozás alapján)

A SENTAB (feszített vasbeton cső) csövekről készült CT felvételen jól látható, hogy a rozsdásodott foltok (3 folt) alatt az acélbetétek elszakadtak. A nagy rozsdafolt alatt a beton károsodását (kiüregelődését) is megfigyeltük Az üreg közvetlen környezetéről felvételeket készítettünk. A megállapíthatjuk, hogy az acélbetétek környezetében kisebb sűrűségű rész látható. A 13 ábrán az elszakadt acélbetétek keresztmetszetét is láthatjuk. A felvételeken megfigyelhető, hogy az acélbetétek közepén kiüregelődés van.



13. ábra Károsodott vasbetoncső kiértékelése CT vizsgálattal

Tűzkárosult szerkezetek és betonok vizsgálata ((8) Hivatkozás alapján)

Tesztvizsgálat

Két órás tűzterhelésnek alávetett, tűzkárosult tübbing elemből magmintát fúrtunk és a mintáról CT felvétel lett készítve.
A 14. ábrán jól látható, hogy a próbatest alsó harmadában, ahol a betont a tűzterhelés érte, egy repedés fut végig, valamit az alsó, hőterhelésnek kitett részen a beton pórusrendszere megváltozott. A magminta az alsó részén, a kisméretű pórusok száma jelentősen megnőtt, feltehetőleg a pórusrendszer változása okozza az analitikus mérések során meghatározott testsűrűség különbséget. A testsűrűség csökkenése pedig utal a tűzkárosodás mértékére. A teszt alapján megállapítható volt, hogy a CT jó lehetőséget nyújt a tűzkárosult épületek vizsgálatához (14.sz. ábra).

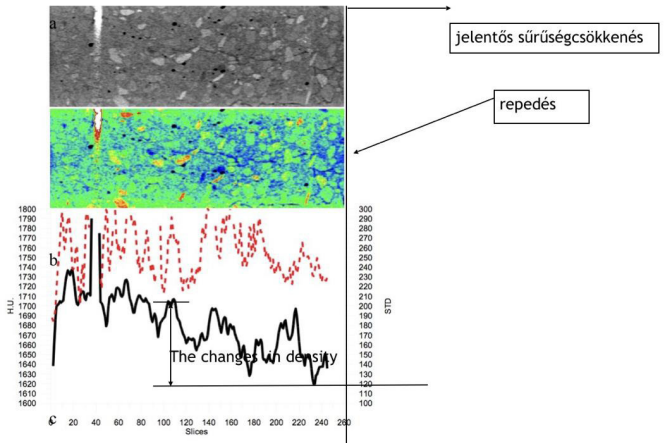


A tűzkárosult szerkezet



A tűzkárosult szerkezetből vett furatmagminta





A magminta a magmintáról készült fényképfelvétel (a), CT felvételek (b) és az egyes szeletekhez tartozó Hounsfield értékek a szórással (c)

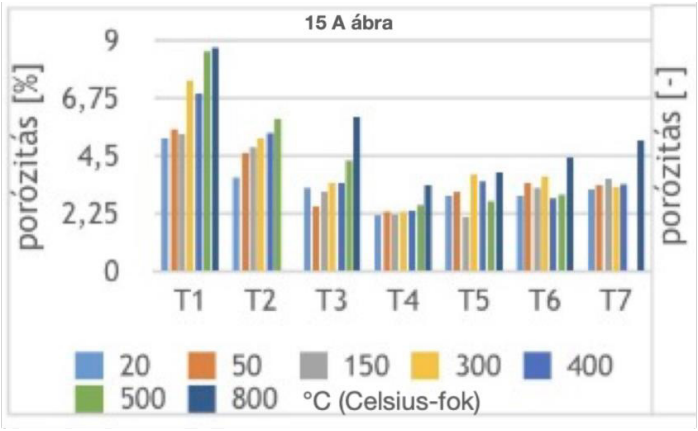
Jól látható hogy a hőtehelés hatására a külső réteg HU értéke változik, tehát ez a mérés alkalmas tűzkárosult szerkezetek vizsgálatára.

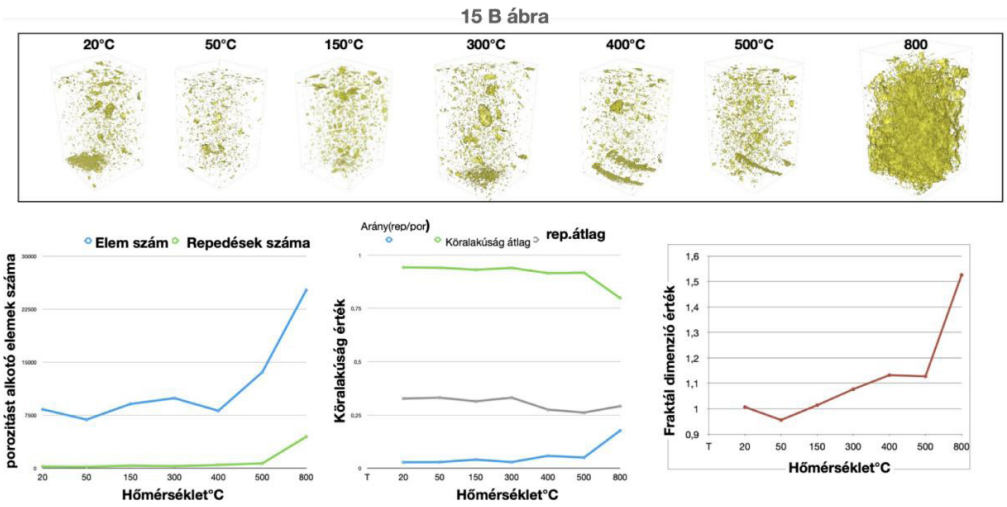
14. ábra Tűzkárosodott beton minta CT vizsgálata

Tűzkárosult beton minták vizsgálatai (NVKP 16-0019 pályázat keretében (12) Hivatkozás alapján)

Az alap receptekből (T1-T7) készült betonokon CT vizsgálatokat is végeztünk. A CT mérés előtt a próbatestek hőterhelve voltak (20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C), majd a hőterhelés után kihűlt állapotban végeztük el a méréseket. A CT vizsgálat után az egyes próbatestek porozitását meghatároztuk a hőmérséklet függvényében. A 15.A ábrán a porozitás alakulását adjuk meg a hőmérséklet függvényében. Jól látható, hogy a hőmérséklet emelkedésének hatására a porozitás minden recept esetén növekvő tendenciát mutat, tehát a CT vizsgálatok alapján következtetni lehetett a hőterhelés nagyságára, vagyis a károsodás mértékére. Ugyanakkor a porozitást okozó pórus és repedésrendszer belső szerkezete is értékelhető. Meghatározható (az adott mérési felbontás függvényében) a pórus-repedés méret eloszlás, ezek aránya valamint a hőhatásra kialakult rendszer bonyolultsága - fraktál dimenziója. 15 B ábra.

Az ábrán jól látható a repedésrendszer és a hálózat bonyolultságának növekedése a hőhatás növekedésével.





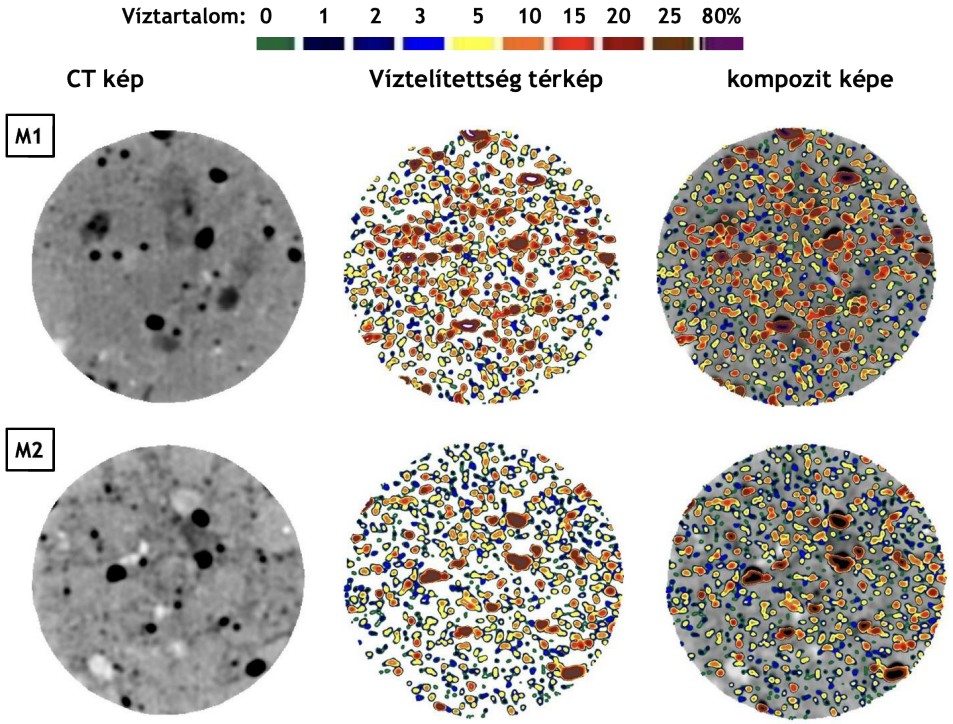
15. ábra Tűzkárosodott beton minták számított porozitás átlag eloszlása egy tipikus porozitás belső szerkezet eloszlásával.

Fagyállóság vizsgálata (BME tesztvizsgálat alapján)

Fagy hatásra a víz szilárd állapotba alakul át, miközben térfogata 9%-kal nő. Az időjárásnak kitett építőanyagokban (hasonlóan a természetes kőzetekhez) ez jelentős eróziós tényező. Ennek a folyamatnak és az eróziós hatásnak vizsgálata nagyon fontos tényező. A BME Építőanyag Tanszék laboratóriumában végzett fagyás vizsgálatok során néhány CT mérési kontroll vizsgálat is történt.

A CT-vel készült felvételen a szabad szemmel nem látható pórusok is megfigyelhetőek, ami lehetővé teszi a teljes pórusrendszer pontosabb feltérképezését. A kísérletek alapján készített telítettségi térképén (vízzel való telítés után) meghatározható, hogy mely pórusokba hatol be a víz és mely pórusok zártak Az ábrán jól látszik, hogy az M2 keverék kevesebb pórust tartalmaz

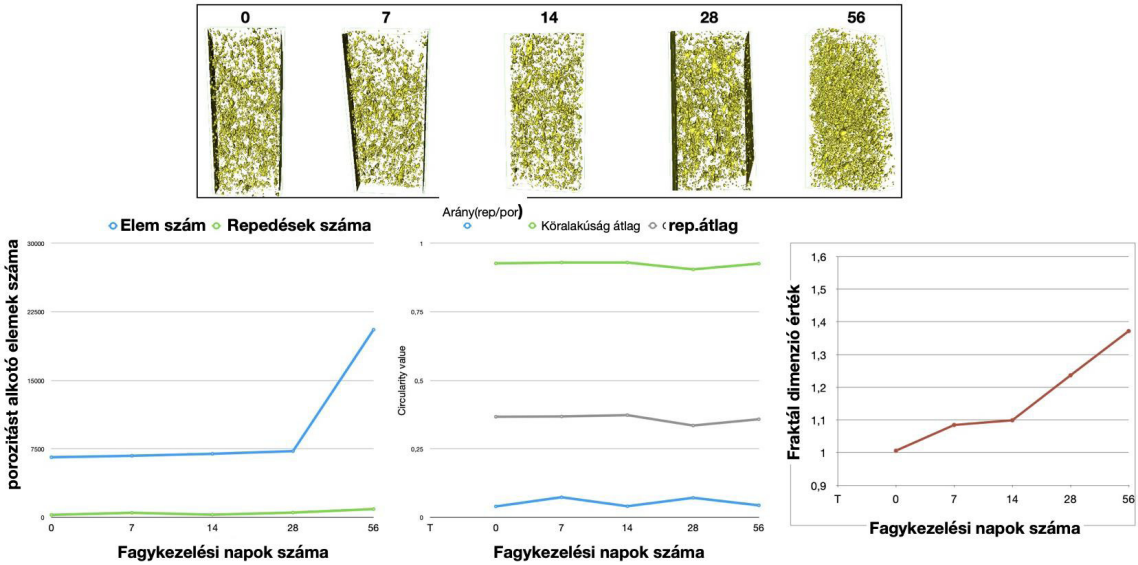
mint, az M1 jelű keverék. Az M1 jelű beton telítettségi térképén is látszik, hogy a teljes és a látszólagos porozitás közel esnek egymáshoz, hiszen majdnem minden pórus vízzel telített (sok a sötét árnyalat). M2 keverék esetén a pórusok nagy része nem tud vízzel telítődni, ez a beton várhatóan tartósabb lesz, mint az M1 beton (16. ábra).



16. ábra Vizzel telített betonminták telítettségi térképeinek összehasonlítása a vizsgálati metszetben

Fagykárosult betonok vizsgálatai (NVKP 16-0019 pályázat keretében (12) Hivatkozás alapján)

A mintákon a CT méréseket a fagyasztás előtt a 7. a 14., a 28. és az 56. napos fagyasztás után végeztük el. A fagyhatás (fagyhámlás) érvényesülését a fentiek alapján nagymértékben befolyásolhatja a beton összetételén kívül a porozitás (ezen belül az effektív-látszólagos porozitás) értéke. A tűzkárosult betonvizsgálatokhoz hasonlóan itt is a fagyhatásból -elsősorban a térfogati defektusból- eredő porozitás növekedés volt tapasztalható. Ez elsősorban csak a felszínközelében és a vízbeszivárgással kevéssé érintett részekhez viszonyítva volt értékelhető. A porozitás belsőszerkezet vizsgálatok alapján a tűzhatáshoz képest egyszerűbb hálózatok épülnek fel. Az ábrán a minták 90 fokkal elforgatott képét a 3D pórus-repedés (elem) eloszlásával, a repedés/ össz elem, és átlagértékeik valamint a számított fraktál dimenzió értékek láthatók a fagykezelési napok számának növekedésével. A repedések az elemek köralakúság értékéből (0.5 alatti értékek) lettek meghatározva (17. ábra).

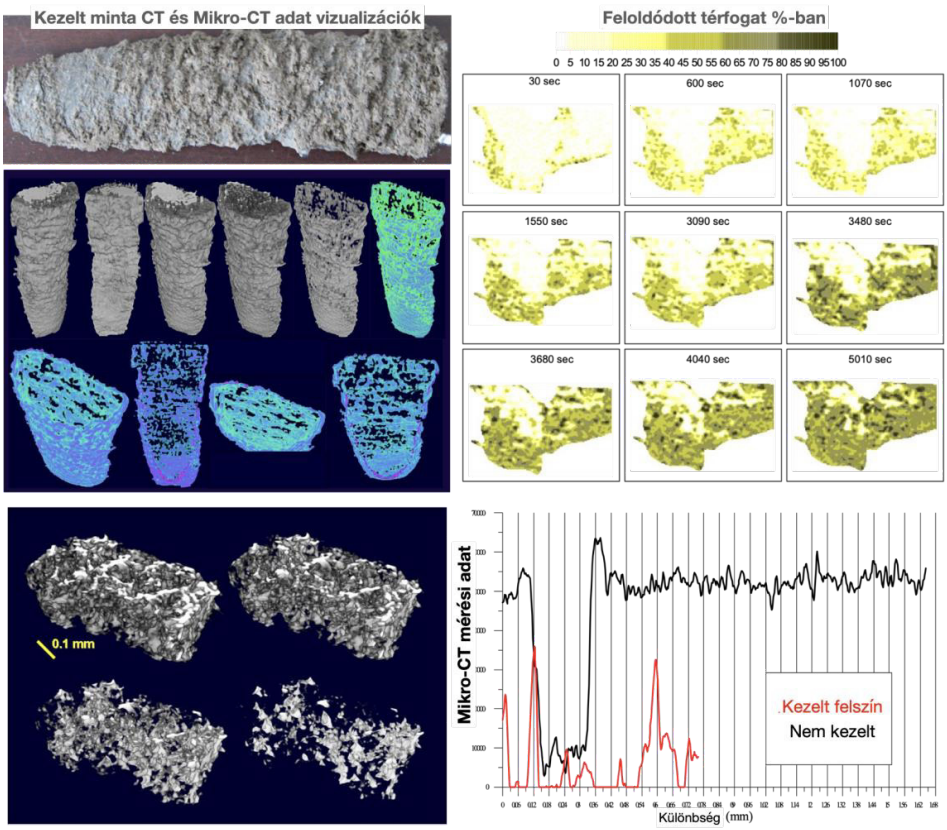


17. ábra Fagykárosodott beton minta tipikus porozitás belső szerkezet eloszlásával.

Kémiai kezelés CT mérés közben. (Teszt kísérlet a rétegkezelés (mélyfúrásban) tanulmányozásához egy kiválasztott mészkő mintán.)

A savazást szobahőmérsékleten 16 %-os sósavval a minta tengelyével párhuzamosan végigvágott magdarab kisebbik darabján végeztük el. A magrész csak részlegesen lett megsavazva három lépcsőben. Mindegyik lépcsőnél a savmaradék ki lett öblítve. A savazás teljes időtartama 3 h volt. A savazás során több sorozatban azonos poziciójú CT mérés történt. A savazás befejezése után a megsavazott magdarabon feltöltéses CT mérést végeztünk (kivákuumozás után) vízzel, a porozitás változás térképezéséhez.
A kisavazott magrész darabon microCT mérést is végeztünk a finom porozitás meghatározásához.

A sav a magdarab cm-es külső szakaszát érintette és az oldódás a peremek felől indult meg mivel itt a sav /kőzettérfogat arány kedvezőbb volt. A kisavazott felület egyenetlenné vált és a sav az üregrendszeren keresztül hatolt be a kőzet belsejébe. A savfront előrehaladási sebessége és a feloldódás- roncsolódás térfogata időben meghatározható volt. Az egyes savazási lépcsők végén jól megfigyelhető volt a savkimerülésével együtt az oldódás csökkenése.

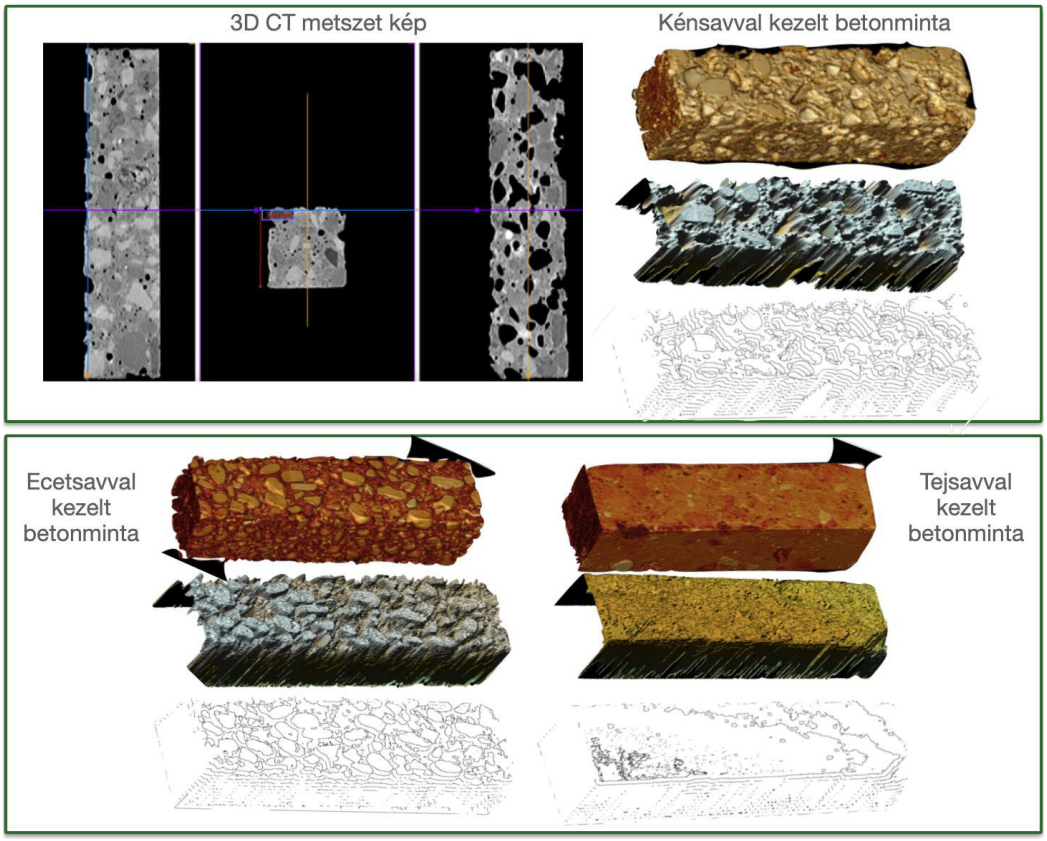


18. ábra CT mérés alatt sósavval kezelt mészkő minta kiértékelése

Kémiai korrózónak kitett mintákon végzett CT vizsgálatok eredményei (NVKP 16-0019 pályázat keretében)

A kémiai kezeléseken átesett betonminták CT méréseit a kiinduló állapothoz képest többször megismételve vagy a kiinduló és a végállapotban lettek elvégezve. Természetszerűleg a kezelések hatására itt is porozitás növekedés áll elő a felszín közelében amely elsősorban a beton összetételével van kapcsolatban és kevésbbé a porozitás nagyságával amely inkább a behatolási maximális mélységét határozza meg. A savazások hatására az adalékanyag összetételétől függően az adalékok is roncsolódnak és az adalék habarcs határa a savak számára jó behatolási lehetőséget biztosíthat. A porozitás belső szerkezet vizsgálatok alapján a savazás eredményeképp közepesen bonyolult (a hőhatáshoz képest kisebb értékű) hálózatok épülnek fel melyben a repedések aránya alacsony.

A CT mérés érzékenyen leképezte a kisavazott felületeket amely alapján a számításokat el lehetett végezni. Egy minta sorozat kisavazott felületeit, izovonalas térképeit, 3D CT metszet képet és 3D vizualizációkat mutatja be a 19. ábra.



19. ábra Kémiailag károsodott betonminták kisavazott felülete, izovonalas térképe, 3D CT és 3D vizualizációja a CT mérés kiértékelése alapján.

5. MEGÁLLAPÍTÁSOK

Összefoglalóan a különböző vizsgálatok során az alábbi eredményeket lehetett felmutatni a CT vizsgálati eredmények segítségével:

A CT segítségével meghatározható vált az **- *útminták vizsgálatánál* -** a rétegeken belüli adalékanyag szemeloszlás, ami laboratóriumi vizsgálatokkal nem lehet meghatározni. Mindezek mellett **károsodott (repedezett, nyomvályús) szerkezetek vizsgálata is lehetővé válik,** amit a laboratóriumi vizsgálatokkal szintén nem lehetett volna elvégezni. A **károsodás mértéke is meghatározható lesz**, így javításuk is egyszerűbbé válik. A CT által előállított **3 dimenziós képet digitális formája miatt a végeselemes modellezésekhez is használhatjuk**, ami segítségével az útpályaszerkezet teherbírása becsülhető, számítható lehet. Az aszfalt minta esetén a **hézagtartalom eloszlás alapján a réteghatárok is egyértelműen beazonosíthatóak** mivel a réteghatároknál a hézagtartalom jelentősen megnő.

A ***szálas beton vizsgálatoknál*** 150×150×600 mm élhosszúságú próbatestek zsaluzott oldalain a szálak a zsaluzat irányába rendeződtek, míg a próbatest közepén véletlen irányultságúak voltak. **A szálirányultságra nem volt jelentős hatása a keverési idő változtatásának. Azonban jelentős hatása volt a bedolgozásban, illetve tömörítésben végzett kisebb változtatásoknak. Kimutattuk, hogy az acél szálak egy része a betonban való keverés hatására deformálódhat.** A deformáció mértéke és gyakorisága csak kis mértékben növekedett a hosszabb (5 perc helyett 30 perc) keverés hatására.

A CT (és MR) vizsgálatokkal (alap és feltöltéses mérések, kísérleti szimulációk) a ***fa anyagok*** **tulajdonságai (pl porozitás) jól tanulmányozható a telítési folyamatokkal együtt:** az alkalmazott módszer az álgeszt jelenlétét kimutatja, az álgesztesedés határa éles, jól kivehető, megegyezik a valós képpel, a törzsszelet teljes területéről egységesen jó minőségű információt kapunk, az álgeszt megléte könnyen felismerhető, a kiértékeléshez nem szükséges hosszas kiértékelési gyakorlat, kiváló lehetőséget biztosít az évgyűrűszerkezet vizsgálatához is, a **kapott mérési adatokból lehetőség van bármilyen irányú telítettségi metszet készítésére, meghatározható a 3D effektív porozitás eloszlás, modellezhető válik a kiszorítási folyamat is.**

A sűrűség csökkenésből mindig valamilyen anyagszerkezeti leromlásra következtethetünk és így az ***-azbeszt alamint a feszített betoncső vizsgálatánál- a*** **károsodott rész környezetét is láthatjuk a CT felvételeken**. Jól látszódott, hogy a károsodott részek H.U. értéke jelentősen csökkent, ami azt jelenti, hogy az anyag sűrűség is jelentősen csökkent. A sűrűségcsökkenés nem egyenletesen következik be, hanem rétegesen, ez a réteges sűrűség csökkenés magyarázza azt a tényt, hogy más roncsolásmentes vizsgálat elég nehezen kivitelezhető. **A felvételeken az acélbetétek károsodása is térképezhető és mérhető volt.**

A CT alatti fatelítéses vizsgálatokhoz hasonlóan savazásokat is lehet végezni. Ennek jó példája volt a bemutatott *mészkőminta sósavas kezelése.* A **savfront előrehaladási sebessége és a feloldódás- roncsolódás térfogata időben meghatározható volt. Az egyes savazási lépcsők végén jól megfigyelhető volt a savkimerülésével együtt az oldódás csökkenése. A microCT felvételekkel a pórusszerkezet roncsolódása is térképezhető és mérhető volt.**

Az NVKP_016-0019 pályázat keretében és az előtte elvégzett tesztvizsgálatokkal együtt az alábbi megállapításokat tehetjük:

Tűzkárosodott betonminták esetén:

Jól látható, volt hogy a hőmérséklet emelkedésének hatására a porozitás minden recept esetén növekvő tendenciát mutat, tehát a CT vizsgálatok alapján következtetni lehetett a hőterhelés nagyságára, vagyis a károsodás mértékére. Ugyanakkor a porozitást okozó pórus és repedésrendszer belső szerkezete is értékelhető. **Meghatározható (az adott mérési felbontás függvényében) a pórus-repedés méret eloszlás, ezek aránya valamint a hőhatásra kialakult rendszer bonyolultsága - fraktál dimenziója és így a repedésrendszer és a hálózat bonyolultságának növekedése a hőhatás növekedésével.**

Fagykárosodott betonminták esetén:

A CT-vel készült felvételen a szabad szemmel nem látható pórusok is megfigyelhetőek, ami lehetővé teszi a teljes pórusrendszer pontosabb feltérképezését. A **kísérletek alapján készített telítettségi térképén (vízzel való telítés után) meghatározható, hogy mely pórusokba hatol be a víz és mely pórusok zártak.** A fagyhatás (fagyhámlás) érvényesülését a fentiek alapján nagymértékben befolyásolhatja a beton összetételén kívül a porozitás (ezen belül az effektív-látszólagos porozitás) értéke. A tűz károsult betonvizsgálatokhoz hasonlóan itt is -a fagyhatásból eredő elsősorban a térfogati defektusból eredően- **porozitás növekedés volt tapasztalható. Ez elsősorban csak a felszínközelében és a vízbeszivárgással kevéssé érintett részekhez viszonyítva volt értékelhető. A porozitás belsőszerkezet vizsgálatok alapján a tűzhatáshoz képest egyszerűbb hálózatok épülnek fel.**

Kémiailag károsodott betonminták esetén:

A savazások hatására az adalékanyag összetételétől függően az adalékok is roncsolódnak és az adalék habarcs határa a savak számára jó behatolási lehetőséget biztosíthat. A porozitás belső szerkezet vizsgálatok alapján a savazás eredményeképp **közepesen bonyolult kisebb értékű hálózatok épülnek fel melyben a repedések aránya alacsony és gyakran a hálózati bonyolultság is csökken a roncsolódás előrehaladásával**. A CT mérés érzékenyen leképezte a kisavazott felületeket amely alapján **a számításokat (pl. behatolási mélység, feloldott térfogat) el lehetett végezni.**

A jelenleg elkészült mérések és értékelések alapján még további kutatási lehetőségek és javaslatok adódnak különösen az alábbi területeken:

Beton anyagokra:

- adalékösszetétel és habarcs összetétel vizsgálatok a laboratóriumi adatok figyelembevételével
- savazás CT mérés kontrolljával (nem igényel eszközfejlesztést)
- keverési folyamat CT mérés kontrolljával (kisebb eszközfejlesztést igényel)
- tűzkárosodás CT mérés kontrolljával (jelentősebb eszközfejlesztést igényel)
- betonkötési folyamat- víztelenedés CT mérés kontrolljával (nem igényel eszközfejlesztést)
- szálas betonoknál feltöltési vizsgálat a szálkorróziók vizsgálatára
- orientált mintavétel károsodott épületen - orientált CT vizsgálattal kombinálva

- törés-feszültségtér vizsgálatok CT mérési kontrollja mellett
- anyagfejlesztések - 3D nyomtatási kísérletekkel CT mérés kontrollja mellett
- 3D VIR alkalmazások CT mérési anyagokon oktatási célból

Fa anyagokra

- tűzállóság vizsgálatok (teszt kísérlet már történt)
- fakezelések tanulmányozása CT mérés közben új kezelési anyagok és technológiák kifejlesztéséhez
- faanyagok karakterizációja, paraméterezése,
- élettani folyamatok tanulmányozása, faminőséget rontó folyamatok (gombásodás, álgesztesedés) okainak tisztázása
- szennyezőanyagok terjedése.

Szigetelőanyagok CT microCT vizsgálatának bevezetése

Kerámia anyagok CT microCT vizsgálata bevezetése

Anyagfejlesztések CT-Micro-CT kontrolljával

Anyag gyártás - modellezés CT mérés kontrolljával

6. A DOLGOZATHOZ FELHASZNÁLT ÉS JAVASOLHATÓ SZAKIRODALOM

(1) Földes, T., Kiss, B., Árgyelán, G., Bogner, P, Repa, I. (2000) Application of medical computer tomograph measurements in 3D reservoir characterization EAGE SAID Conference , Paris , France Conference Volume November.
(2) Bogner P., Földes T., Závoda F., Repa I. (2003) A CT és MR vizsgálatok lehetőségei a szénhidrogénkutatásban, Magyar Radiológia 2003. október pp. 231-237.
(3) Földes, T., Kiss, B., Árgyelán, G., Bogner, P., Repa, I. (2004) Kinga Hips Application of medical computer tomograph measurements in 3D reservoir characterization Acta Geologica Hungarica, Vol.47/1,pp. 63-73.
(4) Földes T. (2011) Kőzetkarakterizáció röntgen computer tomográf (CT) mérésekkel végzett hidrodinamikai vizsgálatokkal Újdonságok a geotermikában pp. 25-42.
(5) A. Benko, T. Földes, T.M. Tóth. A Multiscale Approach for Characterising Fractured Reservoirs, Workflow for Geological Modelling of a Hungarian Reservoir 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012. Copenhagen Conference Volume
(6) BME Szakértői vélemény, 1000 mm átmérőjű SENTAB CSŐ, Csőtörés: 2012. júl. 1., Budapest XI. ker. Orlay utca 2. vizsgálati eredmények és a tönkremenetel lehetséges okai, Készítették: Balázs, L. Gy., Lublóy Éva, Csányi Erika, Czoboly Olivér, 2012 BME reg. szám: 43894 -003/ EA-2012
(8) Lublóy Éva, Balázs L György, Kapitány Kristóf, Barsi Árpád, Földes Tamás: Tűzkárosodott vasbetonszerkezet vizsgálhatósága CT-vel, VASBETONÉPÍTÉS 16:(4), 2014, pp. 86-90
(9) Lublóy Éva, Ambrus Dávid, Földes Tamás: Hézagtartalom mérése aszfalt próbateseteken CT-vel MAGYAR ÉPÍTŐIPAR 64:(4), 2014, pp. 161-165
(10) Lublóy Éva, Földes Tamás, Ambrus Dávid, Kapitány Kristóf, Barsi Árpád: Útpályaszerkezetből vett fúrt magminták szemrevételezése és értékelése CT-vel, ÉPÍTŐANYAG 66:(3), 2014, pp. 64-67

(11) Balázs L. Gy., Lublóy É., Földes T. (2015) Let's look at inside by x-ray computed tomograph (CT), Stuctural Conctere Journal
(12) NVKP 16-0019 pályázat keretében: Geosoft BT és Tomogeo Kft valamint a BME CT mérési és értékelési kutatási jelentések
(13) CT és MR mérések alkalmazási lehetőségei a faipari és erdészeti anyagvizsgálatokban Biró B, Földes T, Jakusch P, Tokai R Országos Radiológiai konferencia Kaposvár 2010 konferencia kötet

BETON FAGYÁLLÓSÁG ELLENŐRZÉSE NUMERIKUS ÉS KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSÁVAL

Schaul Péter
Sólyom Sándor
Salem G. Nehme
Balázs L. György

BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 1-3.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az NVKP_16-0019 projekt keretén belül Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése kerül elvégzésre. Ezen projekten belül az egyik célkitűzés a beton fagyállósági képességének növelése, a fagyállóság pontos mechanizmusának leírása. A laboratóriumi kísérletek és analitikus modellek mellett a laboratóriumi vizsgálatokat leíró végeselemes modell is készült. A modell numerikus eszközökkel igyekszik reprodukálni a fagyállósági vizsgálatokat, melyek mind a pontos mechanizmus megértését, mind pedig a későbbiekben azok esetleges kiváltását elősegítheti.

Jelen cikk a modell felépítésének részleteit, a falhasznált anyagparamétereket és a modell eredményeit tartalmazza.

Kulcsszavak: numerikus analízis, fagyállóság, végeselem, fagyállóság

1 BEVEZETÉS

Beton fagyállósága meghatározó jelentőségű minden olyan mérnöki műtárgy esetén, ahol a megfagyás és felolvadás ciklikusan lehetséges, mint például hidak és infrastrukturális műtárgyak (DAfStb, 2005).

A fagyás-olvadási ciklusok hatásainak megértése, és a következményeinek nyomon követése hosszú évtizedek óta fejtörést okoz mind a kutatók, mind pedig a szabvány alkotók számára.

A kutatások nem vezettek kellőképpen eredményre a folyamat összetettsége és sokrétűsége miatt (Oyamada, Hanehara, Kanano, Nakamura, 2015; Balázs, Kausay, 2009; Kausay, Nehme, Balázs, 2020).

Legtöbb érintett ország gyakorlatává vált ezért, hogy jellemző fagyasztási szituációkat használ ellenőrzésre, amelyek kísérleti teljesülése esetén a szerkezet betonját és ezáltal a szerkezetet is kellőképpen fagyállónak tekintik. Viszont nem teljesülése esetén a fagyállóság növelése szükséges, ami módosított betonreceptúra alkalmazását igényli.

A fagyállósági vizsgálatok jelentős eszközigénye és jelentős időtartama miatt nemzetközileg is kutatások folynak a lehetséges egyszerűsítés elérésére.

Jelen cikk arra vonatkozó erőfeszítés, hogy numerikus vizsgálatokkal a fagyállóság eredménye előre meghatározható-e, elvégezhető-e a fagyállósági vizsgálat tisztán számítási alapon, illetve, hogy milyen feltételek mellett ad kellően pontos eredményt?

2 KUTATÁSI HIPOTÉZIS

A kutatás célja a különböző fagyasztási vizsgálatok numerikus modellezési lehetőségeinek felmérése, illetve azok eredményeinek laboratóriumi vizsgálatok eredményeivel történő összehasonlítása volt. A numerikus modellezés esetén végeselemes modellezésre esett a választás, egy speciális, beton elemekre szakosodott ATENA szoftver segítségével. A vizsgálatok célja közé tartozott az is, hogy felmérjük milyen feltételekkel, és milyen esetekben alkalmazhatóak a numerikus vizsgálatok a fagyasztási vizsgálatok reprodukciójára esetleg kiváltására.

A kutatás során két típusú fagyasztási vizsgálat numerikus szimulációját is elvégeztük, melyek a (1) bemerítéses kocka vizsgálat, valamint a (2) fagyhámlási vizsgálat voltak.

A numerikus vizsgálatok során, a szoftver és a vizsgálati módszer sajátosságai és korlátai miatt közelítésekkel kellett élnünk. Ilyenek voltak a geometriai és megtámasztási tökéletesség, valamint a fagyasztás ciklikus hatásának, mint hőmérséklet változásnak a figyelembe vétele, illetve a víz térfogatváltozása által keltett belső feszültségek figyelmen kívül hatása.

3 AZ ALKALMAZOTT NUMERIKUS MODELL JELLEMZŐI

A beton fejlett végeselemes modellezésének alapja, hogy a beton nyomásra és húzásra történő eltérő viselkedését az alkalmazott anyagmodell kezelni tudja. Ez a feltétel még a nemlineáris anyagmodelleket kezelni tudó szoftverek nagy részében sem lehetséges, speciális betonszerkezetekre kifejlesztett programok használata szükséges (ATENA, DIANA).

Megfelelő eszköz lehet a betonszerkezetek modellezésére a kombinált törési feltételt alkalmazó anyagmodell, mely nyomásra a William-Menétrey, míg húzásra a Rankine törési feltételt használja. A szakirodalomban több törési modell párok is fellelhetők, melyek alkalmasak lehetnek betonszerkezetek modellezésére (Von-Misses és Rankine; Drucker-Prager és Rankine), azonban a legjobb közelítést a fent említett William-Menétrey anyagmodell adja, mely nemcsak a törésig képes az anyagi viselkedést követni, hanem a repedések utáni viselkedésről is megfelelő információt nyújt.

A legfejlettebb végeselemes szoftverek képesek a repedések diszkrét megjelenítésére, valamint a repedéstágasság számítására is. Ehhez fontos definiálni a karakterisztikus hossz értékét, mely a beton feszültség-alakváltozás és feszültség-repedéstágasság diagramja közt teremt kapcsolatot, és leírja a repedések növekedését az adott feszültségnél. A repedések valós idejű megjelenítése, valamint értékeinek számítása a legfőbb előnye a fejlett

végeselemes számítási módnak. Ezen szoftverek lehetőséget nyújtanak az anyagi viselkedést leíró függvények felhasználó általi definiálására is, mely által lehetőség nyílik kísérletek verifikálására, illetve speciális anyagok modellezésére is.

A speciális beton és vasbeton szerkezetekre fejlesztett végeselemes szoftverekben leggyakrabban lehetőség van a betonacélok diszkrét modellezésére, mely azt jelenti, hogy a betonacélok vonalelemként kerülnek a valóságnak megfelelő pozícióba. Ezzel lehetőség nyílik a valós viselkedés modellezésére, valamint a szerkezetek optimalizálására is, hiszen az analízis során meghatározható, hogy mely betonacélok vesznek részt a teherviselésben, és hol található vasalási többlet.

A fagyasztásos vizsgálat modellezése során a beton az említett kombinált törési feltételt alkalmazó anyagmodellel került figyelembe vételre. Ez az anyagmodell a nyomás oldalán a Menétrey-William törési feltételt (Menétrey, P., William K. J. 1995), míg a húzás oldalán a Rankine törési feltételt alkalmazza (Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J. 2013). A beton repedés után állapota a Hordijk görbével (Hordijk, 1991) kerül modellezésre, míg a repedések tágasságának meghatározása a karakterisztikus hossz segítségével történik (Cervenka J, Papanikolaou V.K 2008).

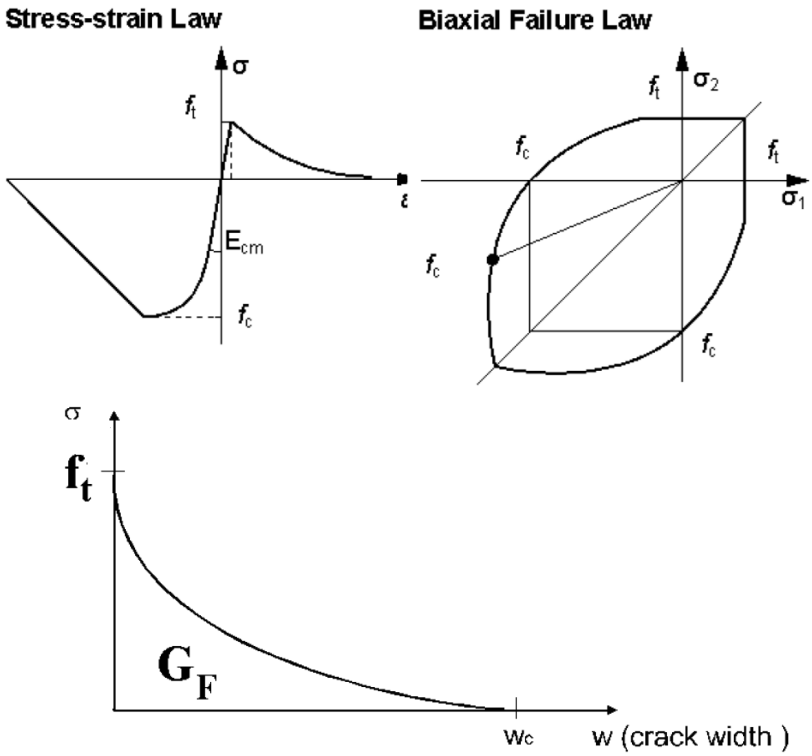
Az anyagmodellek paramétereit az alábbi 1. táblázat tartalmazza.

Tab. 1 A numerikus modellezéshez alkalmazott anyagparaméterek

Beton	
Típus	CC3DNonLinCementitious2
E	32000 MPa
MU	0.2
RHO	2400 kg/m^3
ALPHA	1.200000e-05
FT	2.90 MPa
FC	38 MPa
GF	7.25000e-05 MN/m
WD	-5.000000e-03 m
EXC	5.200000e-01
BETA	0.0
FC0	6.09 MPa
EPS_CP	0.00097438
FIXED	0.0
FC_REDUCTION	8.000000e-0

Acél terhelő lemez	
Típus	C3DBiLinearSteelVonMises
E	210 GPa
MU	0.3
RHO	7850 kg/m^3
ALPHA	1.200000e-05
Folyáshatár	550 MPa

A beton anyagi viselkedését leíró diagramok az alábbi 1. ábrán láthatóak.



1. ábra Beton anyagtörvényeit definiáló diagramok (Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J. (2013)

f_c= nyomószilárdság, f_t= húzószilárdság, G_f= törési energia, w= repedéstágasság, l_{ch}= karakterisztikus hossz

A numerikus vizsgálatok során csak az anyag hőmérséklet változásával, és az abból keletkező feszültségekkel tudtunk foglalkozni. A víz megfagyásából származó térfogat növekedés, a végeselmes szoftver korlátai miatt figyelmen hagytuk. Fontos tehát megjegyezni, hogy a víz fagyás-oladáskori térfogat változásának hatása csak indirekt módon volt figyelembe véve a hőmérsékleti ciklusokból származó leromláson keresztül, a leromlás csak az anyag ciklikus hőtágulása folyamán károsodott.

4 A BEMERÍTÉSES KOCKA FAGYASZTÁS NUMERIKUS SZIMULÁCIÓJA ÉS EREDMÉNYEI

4.1 A modellezés lépései, feltételei

A numerikus modellben a fagyasztás hatása, mint összehúzó hatás került figyelembe vételre. A vizsgálat célja a fagyasztás nélküli kocka nyomószilárdságának és a 28 fagyasztási cikluson átesett kocka nyomószilárdságának összehasonlítása volt. Ehhez a numerikus vizsgálat három különböző terhelésből tevődik össze:

1. *Az első lépésben* egy úgynevezett transzport analízis került elvégzésre. Ennek során a fagyasztási hőmérséklet beton próbatestbe történő behatolása kerül modellezésre. A modell végeredménye azon izotermák, melyek a fagyasztás hatására történő hőmérsékleti értékeket mutatják a próbatest egyes pontjaiban. A transzport analízis során az úgynevezett CERHYD anyagmodell került alkalmazásra, mely lehetőséget biztosít a pontos betonreceptúra paraméterként történő alkalmazására. Ebben az esetben, a betonban a hőmérséklet terjedését a receptúra alapján határozza meg a szoftver.

   A CERHYD anyagmodell az alábbi paramétereket képes figyelembe venni a hőterjedés meghatározásakor:

   - Tervezett beton szilárdsági osztály
   - Víz-cement tényező
   - Cement tömege és testsűrűsége
   - Adalékanyag tömege és testsűrűsége
   - Egyéb kötőanyag tömege és testsűrűsége
   - Tervezett légtartalom
   - Cement típusa (CEM I 32,5R, CEM I 42,5R, CEM I 52,5R, CEM I 52,5N, CEM II/A 42,5, CEM II/B 32,5, CEM III/B 32,5)
   - Adalékanyag típus (bazalt, gránit, mészkő, ill. kvarc).

2. *A második lépésben* a transzport analízis eredményei, mint hőmérsékleti terhek kerültek a próbatestre. Mivel a különböző pontokban a hőmérséklet értéke is különböző, így húzófeszültség keletkezhet a kocka bizonyos pontjain melyek, ha a húzószilárdságot elérik, az egyes végeselemek megrepednek. A ciklikus terhelés egy megnyúlás növekmény hozzáadásával történt, mely értékét a szoftver a Wöhler diagram és a repedések ciklikus megnyílásának értékéből számol. A modell végeredménye a fagyasztási ciklusok hatására mikro és makro repedésekkel rendelkező próbatest feszültségi állapota.

3. *A végső lépésben* az előző lépés végeredményeként kapott kocka nyomó vizsgálata történik, elmozdulás vezérelten. Az elmozdulás egy acél lemezre van működtetve, mely kizárja a lokális tönkremeneteleket. A modell eredménye a fagyasztási ciklusoknak alávetett kocka erő-elmozdulás diagramja.

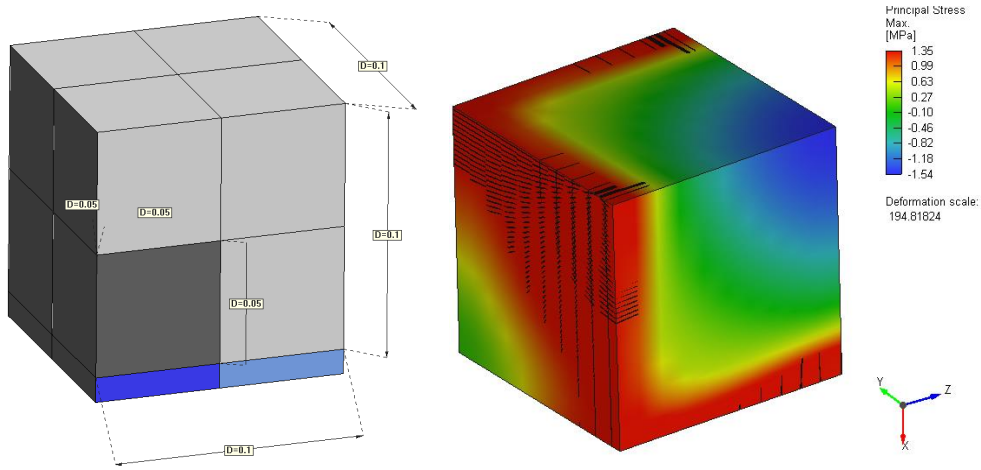
4.2 A végeselemes modell

A végeselemes modell az ATENA végeselemes szoftvercsomag Statikus moduljában készült. A betonelemek, illetve a terhelő keret 3 dimenziós, úgynevezett „brick” elemekből készült. Ezen elemtípus biztosította a próbatest megfelelő, a valósághoz legközelebb álló viselkedését. A 3 dimenziós elemek hexahedra elemekkel kerültek behálózásra. A hexahedra elemek a modell futási idejének optimalizálását, valamint a megfelelő repedésképe kialakulását szolgálták.

A szoftver a Newton-Raphson iterációs módszert alkalmazva a Pardiso egyenletmegoldóval számolta ki a kért elmozdulás értékeket. A többi kért értéket (feszültségek, nyúlások stb.) ezen érték deriválásával számolta ki.

A megfelelő futás érdekében a modell terhelése 100 lépésben történt, melyből minden 10. került elmentésre. Az egyes lépéseknél az iterációs limit 100 volt.

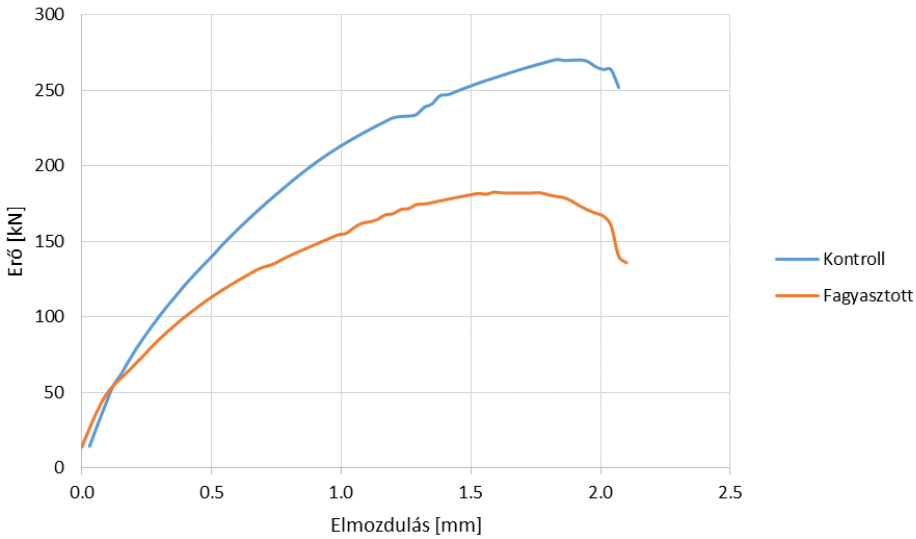
A végeselemes modell geometriája, és eredményei a 2. ábrán láthatók.



2. ábra A próbatest modellezett része (balra) és repedésképe (jobbra)

4.3 Összehasonlító nyomószilárdsági vizsgálat eredményei

A 3. ábrán látható eredmények a három különböző terhelési lépéshez tartoznak. Az erő-elmozdulás diagram összehasonlításánál, egy a bemutatott modell anyagi és geometriai tulajdonságaival felépített, fagyasztás nélküli kontroll modell eredményeivel kerültek összehasonlításra.



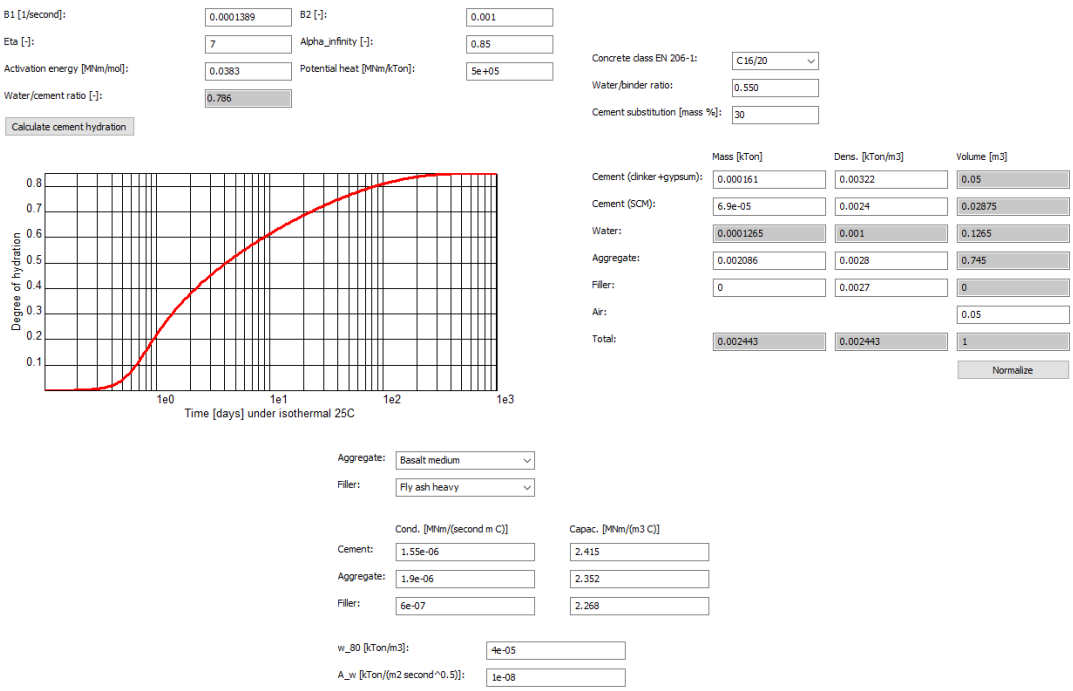
3. ábra Numerikus összehasonlító vizsgálat

5 NUMERIKUS SZIMULÁCIÓ EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA MÉRT SZIGMA – EPSZILON DIAGRAMMOKKAL

A numerikus modell verifikálása elengedhetetlen része minden anyagmodell és szimulációs vizsgálat fejlesztésének. A projekt keretén belül laboratóriumi körülmények között tesztelésre kerültek beton kockák különböző receptúrával, valamint különböző fagyasztási ciklusok után.

Ebben az esetben új anyagmodell került definiálásra, mely követte a laboratóriumban előállított paramétereket.

A hőterjedés esetén a pontos receptúrák kerültek bevitelre a CERHYD anyagmodellbe, így ezáltal lehetőség volt meghatározni az aktuális receptúrák esetén a pontos izotermák kialakulásának módját és azok értékeit.

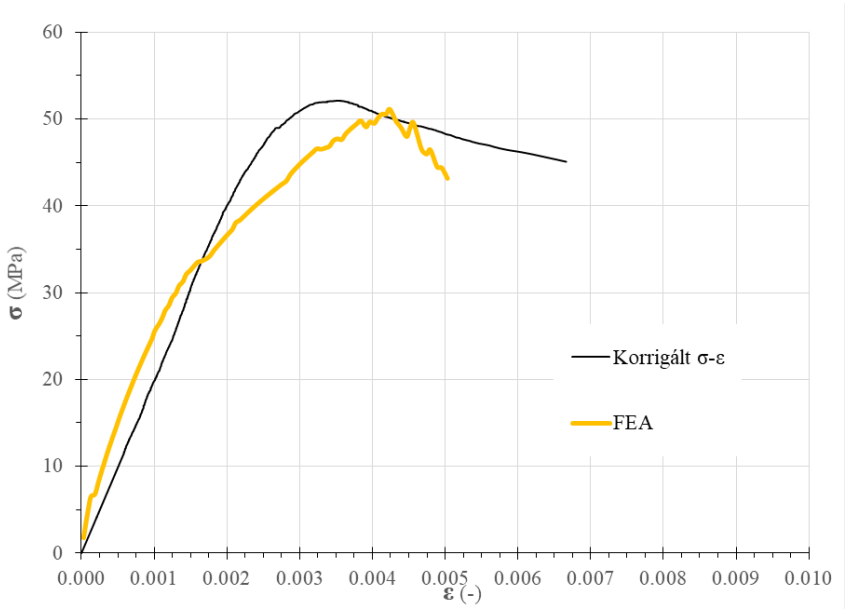


4. ábra CERHYD anyagmodell

A nyomószilárdsági vizsgálat mind fagyasztási hatás nélküli, mind pedig különböző számú ciklikus fagyasztásnak alávetett kocka esetén elvégzésre került.

Az elsődleges feladat a modell paramétereinek felvétele volt, mely a fagyasztási ciklus nélküli eredményekből volt lehetséges.

A 4. ábrán látható módon meghatározásra került a laboratóriumi, valamint a numerikus modell szigma-epszilon diagramja. A két görbe jó egyezést mutatott egymással, csupán a törés közeli alakváltozások tértek el egymástól, ez azonban nem volt jelentős.



5. ábra Numerikus eredmények verifikációja

Ezt követően a különböző receptúrák fagyasztási ciklusoknak alávetett próbatestek kerültek modellezésre. Ebben az esetben a maximális törőerő fagyasztás hatására bekövetkező csökkenését az esetek nagy részében a numerikus modell jól követte (az eltérés kevesebb volt, mint 20%), azonban pár alkalommal a laboratóriumi próbatestek szilárdságnövekedést mutattak, melyet a numerikus modell nem tudott követni. Az alakváltozásokban a már korábban is említett helyen a különbség a fagyasztási ciklusok után is megmaradt.

6 A LEHÁMLÁS VIZSGÁLAT NUMERIKUS SZIMULÁCIÓJA, ÉS NEHÉZSÉGEI

A projekt keretén belül kialakításra került, egy a fagyhámlási vizsgálatot szimuláló modell is. A próbatestek geometriája ebben az esetben 150 x 150 x 50 mm-es hasábok voltak, melyek csak egy oldalról kerültek hűtésre.

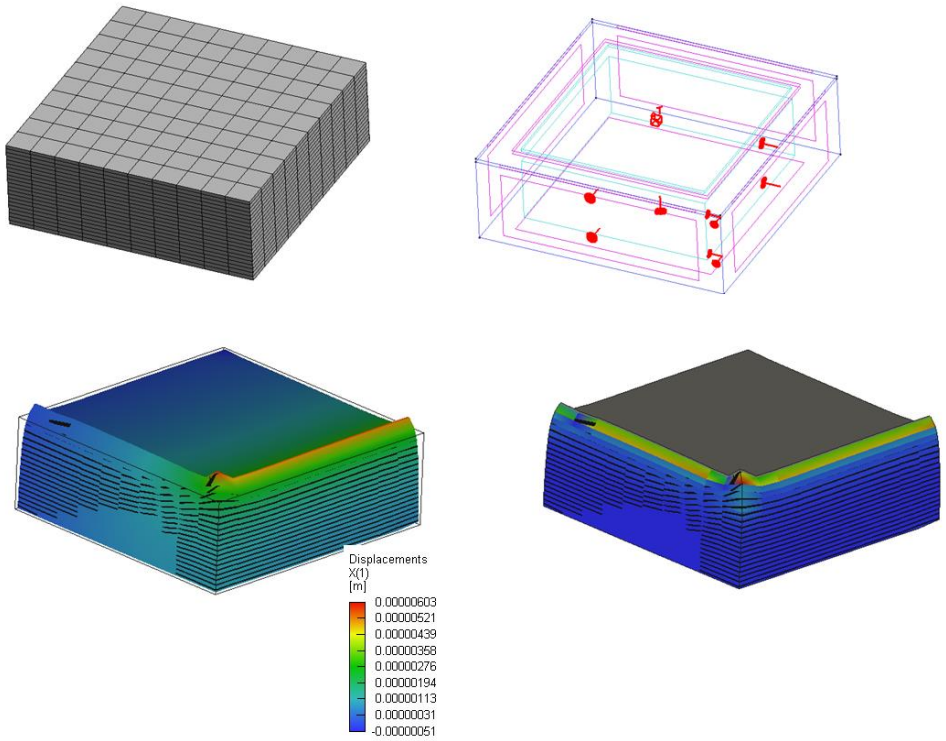
Az alkalmazott anyagmodell és a modellezés lépései a korábban bemutatotthoz hasonlóak voltak. Ebben az esetben azonban nem nyomószilárdsági vizsgálat került elvégzésre a fagyasztási ciklusok után, a fagyhámlási vizsgálat eredménye a ciklusok következtébe létrejövő térfogatveszteség.

Mivel a végeselmes módszer nem képes az anyag elvesztésével számolni, így ebben az esetben szükség volt annak a definiálására, hogy mit tekintünk „anyagvesztésnek”. Ezt célszerű valamilyen repedéstágassághoz kötni, mely után kijelenthetjük, hogy az anyag ezen része már nem képes a továbbiakban részt venni a teherviselésben.

Annak érdekében, hogy ez a repedés kialakulás nyomon követhető legyen, olyan végeselemes háló alkalmazózására volt szükség, mely függőleges értelemben rendkívül

sűrű, és így nyomon lehet vele követni, mekkora az a vastagság, amennyiben a kritikus repedések bekövetkeznek, tehát mekkora anyagvesztéssel számolhatunk.

A modell hátránya, hogy a nagy repedések rendkívül megnövelik a futásidőt, és a konvergenciát pedig megnehezítik.



6. ábra Fagyhámlási vizsgálat numerikus modellje és eredményei

7 KITEKINTÉS

A vizsgáltok eredményei bemutatták, hogy bizonyos feltételek mellett, ismerve a módszer hiányosságait és kritériumait, a numerikus módszerek megfelelő közelítést adhatnak különböző fagyhámlási vizsgálatok esetén. Míg a végeselemes módszer a bemerítéses kocka vizsgálatot közelíti jobban, addig a diszkrét elemes módszerrel valószínűsíthetően közelebbi egyezést kaphatunk a fagyhámlási vizsgálatok eredményeihez.

Továbbhaladási irányként érdemes megjelölni a numerikus szoftver fejlesztését is, mivel a víz megfagyásából adódó térfogat-növekedés hatása kiemelt lehet a fagyasztási vizsgálatok során. Amennyiben ez a nyomás, mint egy, az anyag belsejében ébredő feszültség vizsgálhatóvá válik, úgy jobb egyezés érhető el a vizsgálat numerikus szimulációjával, és az alkalmazási feltételek is lazulhatnak

8 ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálat célja a **bemerítéses beton kocka próbatest fagyasztási ciklusainak**, illetve az ezekből adódó nyomószilárdság csökkenésének numerikus modellezése volt. A modellezés három lépcsőben zajlott: (1) transzport analízis, (2) ciklikus fagyasztás modellezése és (3) nyomó vizsgálat.

A nyomóvizsgálat eredményei egy kontroll próbatest eredményeivel kerültek összeveszésre, amelyen fagyasztási ciklusokat követően végeztünk elmozdulás vezérelt törési vizsgálatot. Az eredményeken jól látszik, hogy a fagyasztási ciklusoknak kitett kocka nyomószilárdsága ~30%-kal csökkent.

A modell verifikálásra került a laboratóriumban elvégzett nyomószilárdsági szigma-epszilon diagramokhoz. Általánosan elmondható, hogy a numerikus számítási eredmények a törőerő tekintetében jó egyezést mutattak, ugyanakkor pár esetben a tapasztalt szilárdságnövekedést a szoftver nem kezelte megfelelően.

A fagyhámlási vizsgálat numerikusan rendkívül nehezen kezelhető, a modellek, egy kiemelkedően felszerelt számítógépen is napokig futottak. A nagy repedések miatt kialakuló energia-feltételek rendkívül nehéz konvergenciát biztosítanak. Ezek alapján ezt a vizsgálatot célszerűbb lehet diszkrét elemes modellekkel lekövetni, melyekben az anyagvesztést a szoftverek kezelni tudják.

Jövőbeni munka tekintetében a modellek további kísérletekkel történő verifikálása szükséges. Ezen felül a további különböző receptúrájú betonok modellezése is elengedhetetlen, mely lehetővé teszi a receptúrák fagyállóságra történő numerikus összehasonlítását.

9 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

10 HIVATIKOZÁSOK

Balázs L. Gy., Kausay T. (2009) „Betonok fagy- és olvasztósó állóságának vizsgálata és követelmények - 2. Vizsgálat”, VASBETONÉPÍTÉS 2009/2, pp. 55-65.

Cervenka, J. and Papanikolaou, V.K. (2008), ”Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete” International Journal of Plasticity (24): 2192-2220

Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka, J. (2013), “ATENA Program Documentation: Part 1 Theory” Cervenka Consulting s.r.o., Prague, 318 p.

DAfStb 560 (2005), „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse”, Deutscher Aussshuss für Stahlbeton Heft 560, p. 109

Hordijk, D.A. (1991) „Local Approach to Fatigue of Concrete”, Doctor dissertation, DelftUniversity of Technology, The Netherlands, ISBN 90/9004519-8.

Kausay T., Nehme S. G., Balázs L. Gy. (2020) „A betonok fagy- és olvasztósó-állóság-vizsgálati hámlásának lassulási folyamata“, VASBETONÉPÍTÉS, 2020/2, pp. 34-42.

Menétrey, P., William K.J. (1995), “Triaxial Failure Criterion for Concrete and Its Generalization”, ACI Structural Journal 92(3). pp 311-318.

Oyamada, T., Hanehara, S.,Kanano, H., Nakamura, D. (2015) „Relationship between new test method with small sized sample and test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals”, Proceeding – Durability Symp. Jun 5-7 2015 Nagasaki, FF0020, 5 p.

"FOKOZOTT ELLENÁLLÓKÉPESSÉGŰ (KÉMIAI KORRÓZIÓNAK FOKOZOTTAN ELLENÁLLÓ, TŰZÁLLÓ ÉS FAGYÁLLÓ) BETON TERMÉKEK ANYAGTUDOMÁNYI, KÍSÉRLETI KIFEJLESZTÉSE" CÍMŰ PROJEKT

- SW UMWELTTECHNIK KFT. ÖSSZEFOGLALÓJA

Molnár Tamás
Lizakovszky Géza

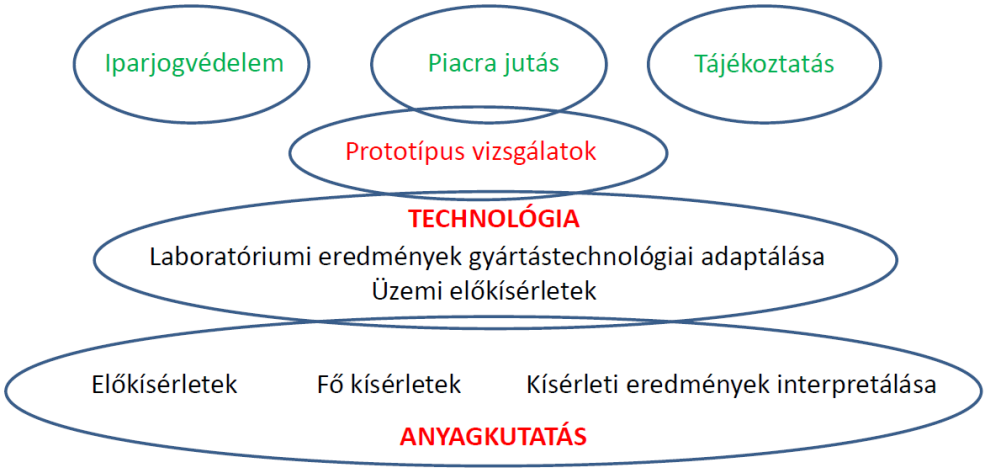
SW Umwelttechnik Kft.
2339 Majosháza, Tóközi utca 10.

1. ELŐZMÉNY

NVKP_16 „B" ALPROGRAM: ANYAGTUDOMÁNYI, TECHNOLÓGIAI NEMZETI PROGRAM

FOKOZOTT ELLENÁLLÓ KÉPESSÉGŰ
(KÉMIAI KORRÓZIÓNAK ELLENÁLLÓ, TŰZÁLLÓ ÉS FAGYÁLLÓ)
BETON TERMÉKEK ANYAGTUDOMÁNYI ÉS TECHNOLÓGIAI FEJLESZTÉSE

Konzorcium: BME – SW – ÉMI – CRH – MC-Bauchemie



I. A PROJEKT ADATAI

Kezdete: **2017. március 1.** vége: **2020. február 28.**
Kért támogatás: 575 362 862 Ft
Összköltség: 659 025 580 Ft
Támogatás intenzitása: 87,31 % (≤ 90%)
Kötelező vállalások:

I.8. Kötelező vállalások

I.8.1 Vállalják legalább 1 db újonnan kifejlesztett termék vagy technológia, vagy szolgáltatás, prototípus létrehozását? — (●) Igen ( ) Nem

I.8.2 Vállalják legalább 1 db know-how elkészülését? — (●) Igen ( ) Nem

I.8.3 Vállalják legalább 1 db hazai iparjogvédelmi oltalom megszerzését, vagy bejelentését? — (●) Igen ( ) Nem

I.8.4 Új K+F munkahely létrehozása
Vállalják, hogy a megvalósítási helyszínen a projekt keretében a projekthez kapcsolódó szaki végzettséghez kötött, legalább 2 fő új álláshelyet teremt. — (●) Igen ( ) Nem

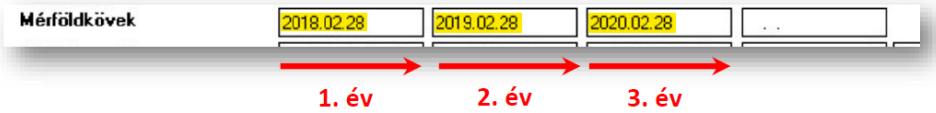
I.8.5 K+F ráfordítások szintjének megőrzése
Vállalkozások vállalják, hogy a projekt fizikai befejezését közvetlenül követő üzleti évben a K ráfordítások összege nem csökken a bázisérték alá? — ( ) Igen (●) Nem

I.8.6 Üzleti hasznosíthatóság:
Egy vállalkozás vállalja, hogy a jelen pályázat keretében támogatott KFI tevékenységből és/vagy annak eredményéből származó árbevétele a projekt fizikai befejezési évét követő 2 egymást követő üzleti évben eléri az általa elnyert támogatási összeg legalább 30%-át? — (●) Igen ( ) Nem

I. A PROJEKT ADATAI

Tudományági besorolás (KSH szerinti):
06 – Ipari termelés és technológia

Mérföldkövek (3):



Indikátorok

Cél: A projekt közvetlenül hasznosítható eredményei
Célelérés dátuma: 2020. 02. 28.

Cél: Társadalmi és gazdasági hasznosítás
Célelérés dátuma: 2022. 12. 31.
(fenntartási időszak)

(konkrét vállalások a 16. és 17. diákon)

2. A PROJEKT TÁRGYÁNAK RÖVID TARTALMI ÖSSZEFOGLALÓJA

Projektet három témakör kutatásával kezdtük meg: *tűzállóság, fagyállóság, kémiai ellenállóság*. **Első évünk** szakirodalmi kutatással, alapanyagok vizsgálatával, valamint a meghatározott termékkörök jelenlegi állapotának feltérképezésével telt. A projekt kezdetén meghatározott, SW Umwelttechnik Magyarország Kft. által gyártott fejlesztendő termékek köre:

Kutatási terület	Termék
Tűzállóság	Körüreges födémbél (MF 200/B és MF 265/B)
Tűzállóság	Falpanel (lágyvasas, egyrétegű)
Tűzállóság	SWALL (feszített, szendvics szerkezetű)
Tűzállóság	TT panel
Fagyállóság	Útépítési vízelvezető elem
Fagyállóság	Feszített tartó
Fagyállóság	Közúti terelőelem
Fagyállóság	Útépítési burkoló elem
Kémiai ellenállóság	Támfalak különböző felhasználásra (GT-L, GT-T)
Kémiai ellenállóság	Akna
Kémiai ellenállóság	Tokos vasbeton csövek
Kémiai ellenállóság	Hengeres vasbeton csövek

Tűzállóság	1.	200 mm magas előfeszített vasbeton körüreges födémpanel (MF 200) betonja
		265 mm magas előfeszített vasbeton körüreges födémpanel (MF 265) betonja
	2.	Lágyvasas egyrétegű falpanel betonja
		Feszített egyrétegű falpanel (SWALL) betonja
	3.	Lágyvasas szendvics szerkezetű falpanel betonja
		Feszített szendvics szerkezetű falpanel (SWALL) betonja
	4.	TT panel, mint alulbordás előfeszített vasbeton födémelem (SWEEP) betonja
	5.	Beltéri felhsaználású, előfeszített vasbeton, T keresztmetsztű gerenda betonja
Fagyállóság	1.	Feszített tartó légbuborékképző szer nélküli fagyálló betonja [XF2(H)] környezeti osztálynak megfelelően
	2.	Útépítésben használatos vízelvezető elemek légbuborékképző szerrel készülő fagyálló betonja (XF2) környezeti osztálynak megfelelően
	3.	Útépítésben használatos burkoló elemek légbuborékképző szer nélkül készülő fagyálló betonja (XF3) környezeti osztálynak megfelelően
	4.	Közűti terelőelemek légbuborékképző szerrel készülő fagyálló betonja (XF2) környezeti osztálynak megfelelően
Kémiai ellenállóság	1.	Mezőgazdaágban is használható silótámfalak szulfátálló betonja (GT-L, GT-T)
		Mezőgazdaágban is használható silótámfalak nem szulfátálló betonja (GT-L, GT-T)
	2.	Mezőgazdasági állatartásra szolgáló elemek betonja (Taposórács)
	3.	Aknaelemek szulfátálló betonja
	4.	Tokos beton- és vasbeton csövek szulfátálló betonja

A második évünkben elvégeztük a BME iránymutatásával meghatározott fejlesztéseket. Ehhez további mintavételeket és termékgyártásokat ütemeztünk. Gyártóhelyi szinten fejlesztettük a *tűzállóságot* a betonösszetétel módosításával, aminek kedvező eredményeit konzorciumi partnerünk (ÉMI) tűzvizsgálati laboratóriumában igazolni is tudtuk. *Fagyállóság* terén ebben a ciklusban a BME laborkísérleteket céloztuk meg. Pozitív eredmény született a CEM III cement kiegészítő anyagként való alkalmazhatóságára. *Kémiai ellenállóság* terén az Egyetem előkísérleteket folytatott, aminek leendő eredményei fogják befolyásolni a további fejlesztési irányokat.

A harmadik év minden esetben a korábbi tapasztalatokra támasztott eredmények életszerű igazolásáról, ill. a megkezdett korábbi kísérletek befejezéséről szólt. Kiemelt eredményeket értünk el a tűzállóság területén, ahol több termékünkkel szemben fejlesztéseket sikerült véghez vinnünk. E mellett értékes tapasztalatokat szereztünk a fagyállóság témakörében, ahol bár termékszintű fejleményekkel nem, de értékes tapasztalatokkal gazdagodtunk. A kémiai ellenállóság témakörében a gyakorlati életben is hasznosítható, termékszintű eredményeket nem sikerült elérünk.

A hosszabbítási kérelem során megkapott **negyedik mérföldkő** a folyamatban lévő vizsgálati eredmények feldolgozásáról, valamint a következtetések és tézisek pontosításáról szólt.

Kitűzött céljainkat nem makulátlanul, de többségében sikeresen teljesítettük. *Ennek tükrében a fenntartási időszakban olyan prototípus termékeket tudunk bevezetni a piacra, ami mind üzleti, mind szakmai előny szempontjából a pályázatban való részvételünk egyértelmű hasznának tudható be.* Megszerzett tapasztalatainkat a hétköznapi élet termelésében, ill. a jövőben tervezett fejlesztési útirányok kitűzésében is hasznosítani fogjuk tudni.

3. ELSŐ MÉRFÖLDKŐ, A KEZDETEK

A kutatási területként meghatározott termékkörökben konzorciumi partnereinkkel szoros együttműködésben megkezdtük mind az alapanyagok, mind a kezdeti (etalon) betonkeverékek mintavételezését, valamint felállítottunk egy vizsgálati tervet az ebből készült próbatestek és termékek vizsgálatára.

Az MF 200/B tűzvizsgálatát első körben párban beépített elemeken kezdtük meg. Az elemek illeszkedési nútjait betonnal töltöttük ki 2017. 06. 15-én.



1. kép: MF 200/B körüreges födémek párban vizsgált csatlakozó éleinek kibetonozása

Az SW Umwelttechnik Magyarország Kft. majosházai telephelyén tűz-, fagy- és kémiai ellenállóság vizsgálatok kezdődtek meg a kiindulási, etalon betonokból levett minták alapján. A kiindulási alapanyagokon túl a CRH segítségével cement mintavételezését is elvégeztük telephelyünkön.



2. kép: Fagyállóság, hídgerenda mintavétel



3. kép: Cement mintavétel az SW Umwelttechnik Kft-nél

A pályázat ezen szakaszában vizsgált és/vagy mintavételezett termékek:

- MF 200/B
- előfej
- hídgerenda
- támfal
- tokos cső
- MF 265/B
- TT panel
- SWALL szendvicsfal
- egyrétegű falpanel
- akna.

4. MÁSODIK MÉRFÖLDKŐ, ÚTIRÁNYOK

Az első mérföldkő tapasztalatait felhasználva a pályázat következő szakaszának az egyes tudományos területeken eltérő stratégiával fogtunk neki. A tűzállóság területén a termékek közvetlen fejlesztésére helyeztük a hangsúlyt. Ez jelentette egyfelől a körüreges termékek adalékvázának betontechnológiai módosítását, másfelől egy speciális PP szál alkalmazását a folyós betonból készült termékterületeken. Ezzel párhuzamosan az Egyetem fagy- és kémiai ellenállóság oldalról laborkísérletekbe kezdett, amiknek tervezett eredményét a következő mérföldkőben fogjuk hasznosítani.

Az előző mérföldkő vizsgálati tapasztalatait felhasználva a tűzállóság terén további kísérletekbe kezdtünk az ÉMI Nonprofit Kft. szentendrei tűzvizsgáló laboratóriumában. Mind az egyrétegű, mind a szendvics szerkezetű elemeknél előremutató vizsgálatokat sikerült produkálnunk.



4. kép: SWALL készítés közben



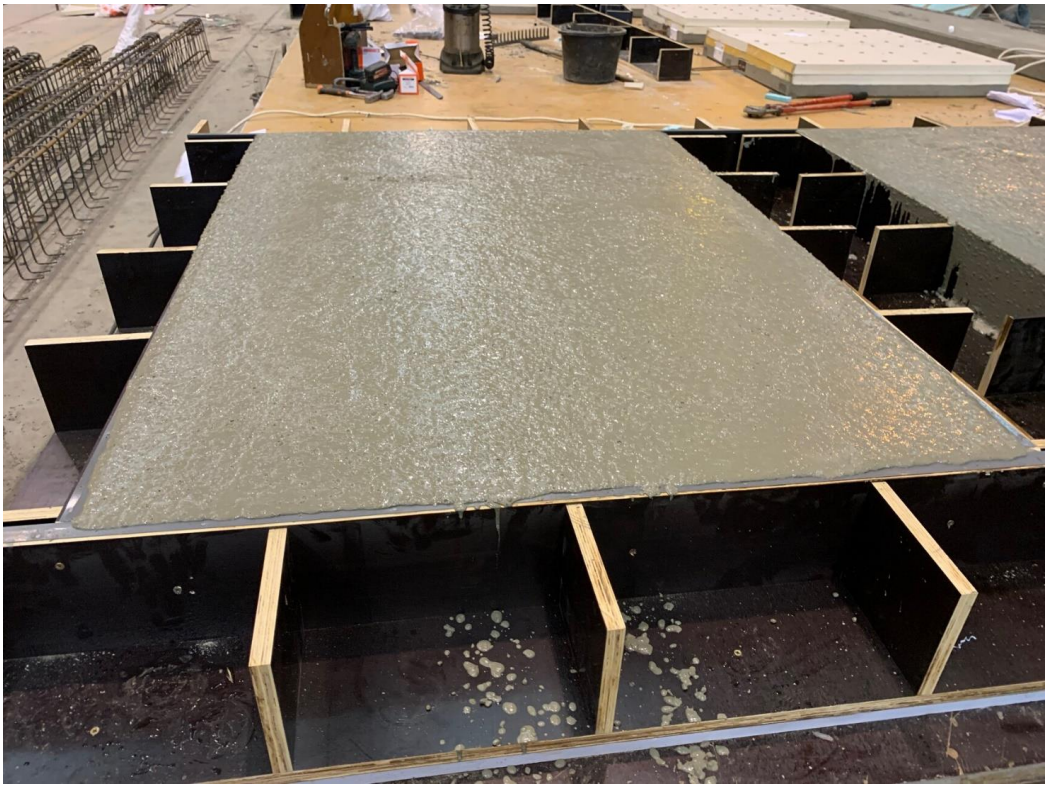
5. kép: Egyrétegű falpanel laboratóriumi mintavétele az SW Umwelttechnik-nél

A pályázat ezen szakaszában vizsgált és/vagy mintavételezett termékek:

- MF 200/B
- MF 265/B
- ReBloc
- előfej
- hídgerenda
- támfal
- támfal (szulfátálló)
- tokos cső
- hengeres cső
- TT panel
- SWALL szendvicsfal
- egyrétegű falpanel

5. HARMADIK MÉRFÖLDKŐ, CÉLOK

Ebben a szakaszban már a know-how és szabadalmi bejelentések véglegesítésére, valamint a sikerrel fejlesztett termékeink véglegesítésére törekedtünk. A tűzvizsgálatnak alávetett termékeink esetében a PP szállal készült fejlesztések egyértelmű javuláson mentek keresztül. Megállapításra került, hogy 1 kg/m3 speciális PP szál már elegendő a tűzállóság egyértelmű fokozásához. A magasabb adagolás egyértelmű és mérhető előnyt nem jelentett.



6. kép: Egyrétegű falpanel gyártása PP szállal



7. kép: Egyrétegű falpanel tartópillérének gyártása PP szállal

A pályázat ezen szakaszában vizsgált és/vagy mintavételezett termékek:
- MF 200/B
- akna
- SWALL szendvicsfal
- egyrétegű falpanel.

Tűzvizsgálat terén elért eredmények:
A gépi, extrúderes gyártás területén a korlátozott változtatási lehetőségek okán (kötött geometria, szál nem adagolható) kisebb sikert értünk el. Adalékváz változtatással és a vizsgálati módszer finomításával + 20 p. tűzállóság fokozásról tudunk beszámolni. Ezek mellett, a folyós beton témakörében, a sablonban készült termékek területén már látványosabb eredményt produkáltunk.

TT-panelnél és egyrétegű falpanalenél + 30 p. eredménybeli növekedést, míg SWALL szendvicsszerkezetű elemeinknél a fejlesztések eredményeként + 120 p. teljesítménynövekedést realizáltunk. Tekintettel a fejlesztett elemek újszerűségére, valamint a piaci potenciálra, méltán vagyunk büszkék a konzorciumi partnereinkkel elért sikereinkre.

Fagyállóság, kémiai ellenállóság:
Bebizonyosodott, hogy a fagyállóság terén a kiindulási alapanyagok minősége nagymértékben befolyásolja az eredményességet. Az Egyetem által kezdetben mért jó laboreredmények az életkörülmények között levett mintavételi próbatestekkel nem voltak összemérhetőek. A gyárban készített minták már közel sem hoztak olyan jó eredményeket, mint amit vártunk volna tőlük. Mivel CRH konzorciumi partnerünk ebben az időszakban nem volt képes egyenletes minőségű alapanyaggal ellátni a kísérletet, ezért felvetődött további gyártók cement alapanyagainak bevonása is.

A kémiai ellenállóság területén több fronton mentek kísérletek, sikerrel beüzemelésre és stabil működésre bírt eljárással használatra kerültek a savas közeget vizsgáló berendezések. Próbatestek szintjén előremutató fejlesztési eredményekről kaptunk beszámolót, de termék viszonylatában ebben a szakaszban nem kaptunk fejlesztésre vonatkozó útirányt.

6. NEGYEDIK MÉRFÖLDKŐ, ZÁRÁS

A pályázat hosszabbítási szakaszában a harmadik mérföldkőben elkezdett, de a hivatkozott hosszabbítási okokra tekintettel be nem fejezett feladatokat véglegesítettük. Cégünknél a fagyállóságra és kémiai ellenállóságra, valamint azok mintavételeire koncentráltunk. Hengeres cső, ReBloc, támfal és előfej termékeket mintavételeztünk. Fagyállóság terén megállapításra került, hogy a légpórusképző szer nélkül készített betonok bár fagyállóak, azok határértéken mozognak. Vagyis stabil fagyálló termékeket (ahol a szabványos követelmények is lehetővé teszik) csak légpórusképző adagolásával javasolt készíteni.

A kémiai ellenállóság területén a 2016-ban bevezetésre került új szabványos jelöléseknek – XA4(H), XA5(H) – nagyobb fokú megfelelést és stabilabb ellenállóképességet sikerült biztosítani. Ezen felül további, tényleges eredményeket nem sikerült realizálni.

Eredményeinket publikációkban, Nyilvánosság Fórumon és a jövőbeli fejlesztéseinkbe való beépítésként fogjuk tudni hasznosítani. A pályázat keretében elért betontechnológiai fejlesztéseink nagy hatással voltak az egyes gyártástechnológiákban elért eredményeinkre. Büszkék vagyunk

kollégáinkra, az elmúlt évek fáradhatatlan munkáira és egy úttal szeretnénk megköszönni konzorciumi partnereinknek a sok segítséget, valamint az ezt követő fenntartási időszakban nyújtott segítségüket.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A pályázat keretében a három témakör (tűzállóság, fagyállóság, savállóság) tekintetében értékes tapasztalatokat szereztünk elemeink műszaki paramétereiről.

Kézzel fogható piaci eredményt **a tűzállóság** témakörében fejlesztett TT panel, ill. egy- és kétrétegű falelemeink értek el. A tűzállósági határértékeket 30 – 120 p-el sikerült növelnünk.

Fagyállóság tekintetében légpórusképző nélküli betonösszetételek esetében csak a vizsgálati határérték közelében mozgó eredményekkel gazdagodtunk. Stabil fagyállósági követelményt – ahol a szabványos környezet is engedélyezi – továbbra is légpórusképzővel tudunk elérni a pályázat keretében fejlesztett összetételek esetében.

Kémai ellenállóság tekintetében új vizsgáló eszközökkel és módszerekkel ismerkedtünk. A piaci fenntartást a TT-panel és falpanelek viszonylatában fogjuk elvégezni, ill. az itt gyűjtött szakmai tapasztalatainkat fogjuk kamatoztatni.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

PUBLIKÁCIÓK

BETONOK OLDÓDÁSOS KORRÓZIÓJA – SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

1. RÉSZ: A VIZEK ÉS FOLYADÉKOK KÉMHATÁSA, KEMÉNYSÉGE, AGRESSZÍV SZÉNDIOXID-TARTALMA

Dr. Balázs L. György – Dr. Kausay Tibor – Dr. Kopecskó Katalin – Dr. Nemes Rita – Dr. Nehme Salem G. – Dr. Lublóy Éva – Dr. Józsa Zsuzsanna – Dr. Arany Piroska

A megszilárdult betont, betonterméket, vasbeton vagy feszített vasbeton szerkezeti elemet használata során a mechanikai és fizikai károsító hatásokon kívül kémiai korróziós hatások is érhetik. A kémiai korrózióra a beton ásványi összetevői (adalékanyag és inert kiegészítő anyag) és kötőanyaga (a továbbiakban cementköve) egyaránt érzékenyek lehetnek. A cementkő kémiai korróziója vonatkozásában oldódásos korrózióról, duzzadásos korrózióról és sók okozta korrózióról beszélhetünk. Oldódásos korróziót lágy vizek, agresszív széndioxid (CO_2) tartalmú vizek, szervetlen és szerves savak okozhatnak. A károsító hatások, így az oldódásos korrózió is csökkenti a beton, vasbeton és feszített vasbeton termékek használati értékét és használati biztonságát, ezért az oldódásos korrózionak az átlagosnál fokozottabban ellenálló betonok kifejlesztése és alkalmazása gazdasági és biztonságtechnikai érdek.

Kulcsszavak: beton, oldódásos korrózió, pH-érték, keménység, agresszív széndioxid-tartalom

1. BEVEZETÉS

A vasbetonszerkezetek tartósságával és korrózióállóságával foglalkozó tudományág viszonylag fiatal. A II. világháborút követő években jelentkeztek az első jelentősebb meghibásodások az acélbetétek korróziója folytán, amelyet voltaképpen a beton meg nem felelő voltára, nevezetesen arra lehetett visszavezetni, hogy egyrészt a karbonátosodási mélység, másrészt a kloridbehatolás elérte az acélbetéteket. A vasbeton építmények korróziójának tanulmányozására 1987-ben az Európai Korróziós Szövetségen (EFC, European Federation of Corrosion) belül munkacsoportot hoztak létre. Hamarosan bebizonyosodott, hogy a vasbetonszerkezetek tönkremenetele a karbonátosodásnál és a kloridbehatolásnál szélesebb körű folyamat eredménye is lehet, amelyet jelentősen befolyásol a beton tartóssága és korrózióállósága.

A beton tartóssága és korrózióállósága attól függ, hogy anyagtani összetétele és szövetszerkezete milyen mértékben teszi alkalmassá az idők folyamán ráháruló hatások jelentős károsodás (például a betonanyag-változás előrehaladásának sebessége > 1,0 mm/év) nélküli viselésére. Az MSZ EN 1504-9:2009 szabvány szerint a betont az erőtani (mechanikai) hatásokon kívül fizikai (fagy és olvasztósó hatás, hőterhelés, sóképződés, zsugorodás, erózió, koptatás) és kémiai (alkáli reakció, agresszív hatóanyagok, biológiai aktivitás) hatások károsíthatják. A beton tönkremenetelét fokozza, ha a szó szoros értelmében vett kémiai korrózióhoz koptatóhatás is társul, ezért a szakirodalomban az oldódásos kémiai korrózió és a mechanikai kopás együttesét sokszor eróziónak (erosion → latinul: erodere = tönkretenni, lepusztítani) nevezik.

Az MSZ 4798:2016 betonszabvány a fizikai és kémiai hatásokat összefoglaló névvel környezeti hatásoknak nevezi, a természetes talaj és talajvíz, valamint felszíni vagy felszínre jutó természetes vizek okozta kémiai korrózió hatásait az XA1, XA2 és XA3, a szennyvizek, valamint egyéb agresszív vizek, folyadékok, gázok, gőzök, permetek és erjedő anyagok okozta kémiai korrózió hatásait az XA4(H), XA5(H) és XA6(H) környezeti osztályba sorolja. A kémiailag agresszív hatóanyagok a beton duzzadásos vagy oldódásos korrózióját, esetleg egyidejűleg mind a kettőt okozhatják (MSZ 4798:2016).

A térfogat-növekedéssel járó *duzzadásos korróziót* elsősorban a **vízben oldott, a cementkő monoszulfát összetevőjével** reakcióba lépő szulfátok okozzák: A hidratáció során a trikalcium-aluminát klinkerásvány ($3CaO \cdot Al_2O_3$) kalciumszulfát (kötésszabályozási céllal adagolt gipszkő, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) jelenlétében – melléktermék nélkül – főtermékként kalcium-aluminát-szulfátokká, a természetben is előforduló *ettringitté*, másnéven *triszulfáttá* ($6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O$) és a természetben elő nem forduló ún. *monoszulfáttá* ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_3 \cdot 12H_2O$) alakul. Sok szulfátion jelenlétében ettringit (ezt elsődleges ettringit **képződésnek nevezik), kevés szulfátion jelenlétében** monoszulfát képződik, és ezek a trikalcium-aluminát és szulfátionok arányának függvényében kölcsönösen átalakulhatnak egymásba (*Riesz*, 1989; *Kopecskó,* 2006). A ferritfázis ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) hidratációja során is főtermékként ettringit és monoszulfát keletkezik, csak az alumínium egy részét vas helyettesíti, és a melléktermék alumínium-hidroxid. Későbbi, külső szulfátforrás hatására a monoszulfát a betonban ettringitté alakulhat (ez a másodlagos ettringit képződés), ez az átalakulás térfogat-növekedéssel jár, és káros duzzadást okoz (ezt szulfátkorróziónak hívják) (*Riesz*, 1989).

Oldódásos korrózió esetén elsősorban a cementkő könnyen oldódó mészvegyületeit a savak, a cserebomlásra hajlamos sók, a növényi, valamint állati zsírok és olajok kioldják, miközben a beton felülete általában lassan elmállik. Oldódásos korróziót például **a vízben oldott agresszív széndioxid, a magnéziumionok**, ammóniumionok, savak, továbbá a lágyvizek okozhatnak; ezen kívül a biológiai aktivitás is okozhat oldódásos korróziót.

2. A BETON KÉMHATÁSA

A beton kémhatását pórusvizének, más szóval az elgőzölhető víz (szabad víz, kapilláris víz, gélvíz) pH-értékével fejezhetjük ki. A beton oldódásos korróziója és az acélbetét korrózióvédelme szempontjából lényeges körülmény, hogy a megszilárdult beton a cementkő szabad $Ca(OH)_2$ (kalcium-hidroxid, mészhidrát, portlandit) tartalmának köszönhetően alapjában véve lúgos kémhatású anyag, pH-értéke általában mintegy 12,5. Ez az érték valójában a környezeti feltételeknek, a beton ösz-

szetételének (cement mennyisége és fajtája, kiegészítő anyag adagolás), tömörségének, a szerkezeti elem felületétől mért távolságának függvénye, és az idő függvényében is változik. A levegővel érintkező beton felületi rétegében a le nem kötött kalcium-hidroxid a levegő széndioxid-tartalmával reakcióba lép, és eleinte kalcium-hidrogén-karbonáttá ($Ca(HCO_3)_2$), majd vízvesztés révén idővel semleges kémhatású kalcium-karbonáttá (mészkővé) alakul:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O.$$

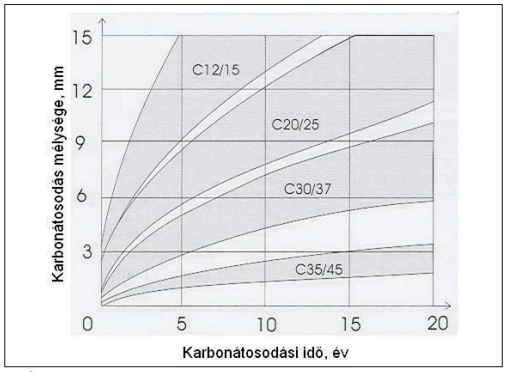
Ez a jelenség a karbonátosodás, amely a betonszerkezet felületi rétegében a kapillárisok elzáródása és a szilárdság növekedése szempontjából kedvező, vasbeton vagy feszített vasbeton esetén viszont a lúgos kémhatás megszűnése folytán az acélbetét korrózióvédelme szempontjából kedvezőtlen, mert a folyamat előrehaladtával a karbonátosodott felületi betonréteg lassan eléri az acélbetétet, és pH = 9,0-9,5 érték alatt az acélbetét korróziója elkezdődhet. Ez adja a vasbetonok és feszített vasbetonok betonfedésének a jelentőségét.

A karbonátosodás előrehaladásának sebessége eleinte nagyobb, később csökken, mert a betonfedés mélyebb rétege és a beton már karbonátosodott, tömörebb külső kérge a széndioxid behatolásának mértékét csökkenti (*1. ábra*).

A karbonátosodás 30-70% közötti relatív páratartalom mellett a legerőteljesebb; 100% relatív páratartalom esetén leáll, mert a beton pórusai vízzel telítettek, 0% relatív páratartalom közelében pedig hiányzik a víz a karbonátosodáshoz.

A beton pillanatnyi kémhatását fenolftalein vagy timolftalein indikátor oldatos ecseteléssel vizsgálhatjuk meg. Az alkoholos fenolftalein-oldat színe a 8,3-10,0 pH-értékű felületre permetezve lila, püspöklila, az átcsapási tartomány alsó határa alatt pedig színtelen. A timolftalein-oldat színe 9,3-10,5 pH-érték között változik kékre. A karbonátosodás kezdetéhez mintegy pH = 9,2 érték tartozik, ezért annak kimutatására a timolftalein alkalmasabb, mint a fenolftalein.

A megszilárdult beton karbonátosodási mélységét – 70 ml etil-alkoholban oldott 1,0 g fenolftalein és desztillált vagy ionmentes vízzel 100 ml-re hígított – fenolftalein-oldatos ecseteléssel az MSZ EN 14630:2007 szabvány szerint lehet meghatározni.



1. ábra: *Karbonátosodás mélysége az idő és a beton nyomószilárdsági osztálya függvényében (Klopfer, 1978)*

3. A pH-ÉRTÉK, LÚGOSSÁG, SAVASSÁG

A tiszta vízben a vízmolekulák igen kis része ionokra disszociált formában található meg, ez a víz öndisszociációja. Ennek során az azonos vízmolekulák között hidrogénion átadás történik, tehát az öndisszociáció következtében vizes oldatokban a víz oxóniumionra (H_3O^+) és hidroxilionra (OH^-) bomlik (*Neumüller*, 1983):

$$H_2O + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH^-,$$

és ezek egyensúlyi koncentrációja:

$$[H_3O^+] = [OH^-] = 10^{-7}\ mol/dm^3,$$

amiből a víz egyensúlyi állandója:

$$K=([H_3O^+]\cdot[OH^-])/[H_2O^+]^2$$

Mivel a víz disszociációfoka (α) rendkívül kicsi (25 °C-on $\alpha = 1{,}8\cdot10^{-9}$), a disszociáció folytán a nem disszociált vízmolekulák koncentrációja nem változik meg számottevően. Ezáltal a víz koncentrációja, $[H_2O]$ állandónak tekinthető, vagyis felírhatjuk, hogy

$$K\cdot[H_2O^+]^2 = [H_3O^+]\cdot[OH^-]$$

amiből a víz ionszorzata:

$$K_{víz} = [H_3O^+]\cdot[OH^-] = 10^{-7}\cdot10^{-7} = 10^{-14}\ mol^2/dm^6.$$

A *pH-érték* (potentia hydrogeni) valamely híg vizes oldat oxóniumion-koncentrációjának negatív logaritmusa (a 10-es alap negatív hatványkitevője):

$$pH = -\log_{10}[H_3O^+] = -\lg[H_3O^+]$$

vagy egyszerűbben, a hidrogénion-koncentrációjának negatív logaritmusával kifejezve:

$$pH = -\log_{10}[H^+] = -\lg[H^+].$$

A pH-érték tehát lényegében egy dm^3 vizes híg oldatban lévő hidrogénionok mol-ban kifejezett mennyisége; semleges kémhatású vízben 10^{-7} mol/dm^3, (azaz pH = 7), savanyú oldatban ennél nagyobb (például 10^{-4} mol/dm^3, azaz pH < 7), lúgos oldatban kisebb (például 10^{-12} mol/dm^3, azaz pH > 7).

A vizek és folyadékok indikátor papírral (lakmuszpapírral) és összehasonlító pH-skálával való tájékoztató pH-érték mérési módszerének leírása az MSZ 260-4:1971 szabvány 2. fejezetében található; az általánosan, így szennyvizek esetén is alkalmazható pontosabb eredményt adó elektrokémiai (elektropotenciometriás vagy egyszerűbben kifejezve potenciometriás) mérést a szabvány 3. fejezete, a kolorimetriás meghatározást a szabvány 4. fejezete tárgyalja.

A pH-érték potenciometriás meghatározásával számos további szabvány is foglalkozik:

- a vizes oldatok, talajvizek pH-értékét az ISO 4316:1977 szabvány szerint,
- az ivóvizek, felszíni és felszín alatti vizek, szennyvizek pH-értékét az MSZ 1484-22:2009 szabvány szerint,
- az eső-, ivó-, ásvány-, fürdővizek, felszíni és felszín alatti vizek, kommunális és ipari szennyvizek, folyékony iszapok (eleven iszapok) pH-értékét az MSZ EN ISO 10523:2012 szabvány szerint,
- a szennyvíziszapok (üledékek, eleveniszapok) pH-értékét az MSZ EN 12176:2000 szabvány szerint,

1. táblázat: Szennyvizek okozta szulfidos betonkorrózió a pH-érték függvényében (Zementmerkblätter T3, 2009)

Csatornafalon lecsapódott vízcseppek pH-értéke	Mikro-organizmusok cellaszáma	Beton-korrózió várható mértéke	Beton felületi korróziójának sebessége, mm/év	Felújítás szükségessége az építés után, év	Korrózió-védelem
7 - 13		nem várható			Tömör beton esetén nem szükséges
6 - 7	$0 - 10^2$	gyenge	Finom részek eróziója	> 80	
3 - 6	$10^3 – 10^5$	közepes	< 0,5	> 40	Beton-technológiai intézkedések
0 - 3	$10^6 – 10^8$	erős	> 0,5	> 5	Felületi bevonat

- a szennyvíziszapok, kezelt biohulladékok, friss és légszáraz állapotú termőföldek és erdei talajok pH-értékét az MSZ EN 15933:2013 szabvány szerint lehet meghatározni.

A pH-érték meghatározási szabványokban szereplő potenciometriás módszer általában olyan elektrokémiai cella potenciálkülönbségének mérésén alapul, amelynek egyik félcellája a mérőelektród, másik félcellája a referenciaelektród. A mérőelektród potenciálja a mérőoldat hidrogénion-koncentrációjának függvénye. A módszer általában 2 és 12 közötti pH-érték esetén alkalmazható.

A vizek, így a kommunális szennyvizek korrozív voltát általában a pH-érték alapján lehet megítélni, amelyen kívül jelentősége van a szennyvíz hőmérsékletének, töménységének, hatásidejének, valamint a mechanikai igénybevételeknek is (*1. táblázat*). A szennyvizekben előforduló szulfidok (S^{2-}) értékelése során arra kell tekintettel lenni, hogy csak az oldott állapotban lévő szulfidoknak a pH-értéktől függő része okoz gáz alakban elillanó kénhidrogénként korróziót. Az oldott kénhidrogéneket a DIN 38405-26:1989 szabvány szerint lehet meghatározni (*Stein* et al., 2005; Zementmerkblätter T3, 2009).

Bosseler et al. (2005) a szennyvizek és savak agresszivitását a cementhabarcsra a pH-érték függvényében a *2. táblázat* szerint, a DIN 4030-1:2008 szabvány a talajvizekre és a Materialprüfungsanstalt (2007) a szennyvizekre a *3. táblázat* szerint adta meg. Az utóbbiakban ugyanúgy sorolják be a vizeket a pH-értékek alapján az XA1 – XA3 környezeti osztályba, mint az MSZ EN 206:2013+A1:2017, illetve az MSZ 4798:2016 szabványban.

2. táblázat: A szennyvizek és a savak agresszivitása a cementhabarcsra a pH-érték függvényében (Bosseler et al., 2005)

Ható közeg	pH-érték	Agresszivitás
Ipari szennyvíz	1,0 – 14,0	Agresszivitása a közepestől a nagyon erősig terjed
Kommunális szennyvíz	6,6 – 10,0	Gyengén agresszív
Esővíz	4,5 -7,0	Agresszivitása a gyengétől a közepesen savasig terjed
Szervetlen és szerves savak	3,0 – 4,5	Erős savas agresszivitás
Biogén kénsav	< 3,0	Nagyon erős savas agresszivitás

A 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet 4. számú melléklete szerint közcsatornába 6,5 – 10,0 pH-értékű szennyvizet szabad bocsátani. A beton felületén megjelenő biofilm hidrogénion-koncentrációja helyenként például pH = (4 – 5) értékre is süllyedhet, amely körülmény a beton oldódásos korrózióját okozza, annak ellenére, hogy a szennyvíz hidrogénion-koncentrációja mintegy pH = 7.

A gyakorlatban a pH-érték szinonimájaként sokszor a lúgosság, illetve a savasság kifejezést használják, míg a tudományos értekezésekben megkülönböztetik a pH-érték és a lúgosság, illetve a savasság fogalmát.

A víz *lúgosságát* az oldott alkálifémek (nátrium, kálium stb.) és alkáliföldfémek (kalcium, magnézium stb.) hidroxidjai (OH^- iont tartalmazó vegyületei), karbonátjai (CO_3^{2-} iont tartalmazó vegyületei) és hidrogén-karbonátjai (HCO_3^- iont tartalmazó vegyületei) okozzák. A lúgosság más szóval a vízben lévő, savval reakcióba lépő anyagok összege, amely a titrálás végpontjának pH-értékétől függ.

Kétféle lúgosság különböztethető meg, úgymint: a fenolftalein lúgosság (jelölése p-lúgosság) és a metilnarancs lúgosság (jelölése m-lúgosság). A víz összes lúgosságán mindig az m-lúgosságot kell érteni. A metilnarancs indikátor a víz lúgosságát okozó összes vegyületet, tehát a hidroxidokat és karbonátokat vagy a karbonátokat és hidrogénkarbonátokat, míg a fenolftalein indikátor csak a hidroxidokat és a karbonátok mennyiségének a felét jelzi. Képletekkel kifejezve:

$$m = OH^- \text{ mval/dm}^3 + CO_3^{2-} \text{ mval/dm}^3$$

vagy

$$m = CO_3^{2-} \text{ mval/dm}^3 + HCO_3^- \text{ mval/dm}^3$$

$$p = OH^- \text{ mval/dm}^3 + \text{ mval/dm}^3.$$

A „val” az anyagmennyiség régi mértékegysége, amelyet 1978. január 1-jén a mol SI-mértékegység váltott fel. A val és a mol számszerű átszámítása a z egyenértékűségi tényezővel (számmal) történhet: $n_{val} = n_{mol} \cdot z$, ahol z a protonok (H^+) száma, amelyet egy sav leadni, illetve a hidroxilionok (OH^-) száma, amelyet egy lúg leadni képes. 1,0 val = 1,0/(az ion vegyértéke) mol, például szénsav (H_2CO_3) esetén z = 2,0 és 1,0 val = 0,5 mol (n_{val} = 1,0 és n_{mol} = 0,5).

Az 1,0 mval/dm^3 = 0,001 val/dm^3 keménységű víz 1,0 dm^3-ében 1,0 mg egyenértéksúlynyi keménységet okozó kalcium- és/vagy magnézium-só van feloldva. 1,0 mval/dm^3 keménység megfelel 2,805 °nk német keménységi foknak (2,805 a kalcium-oxid molekulatömegének tizedrésze, tekintve, hogy a titráláshoz 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú sósavat használunk).

Megjegyzés: Anyagmennyiség-koncentráció (c_B) alatt az 1,0 dm^3 oldatban (V_0) lévő, M_B moláris tömegű oldott anyag mólokban kifejezett kémiai anyagmennyiségét (n_B) értjük mol/dm^3 vagy mmol/cm^3 mértékegységben:

$$c_B = \frac{n_B}{V_0} = \frac{m_B/M_B}{V_0}$$

3. táblázat: *Talajvizek és szennyvizek pH-érték szerinti besorolása Németországban (DIN 4030-1:2008; Materialprüfungsanstalt, 2007)*

DIN 4030-1:2008	Környezeti osztály			–
	XA1	XA2	XA3	
pH-érték	6,5 – 5,5	5,5 – 4,5	4,5 – 4,0	
Materialprüfungsanstalt, 2007	Korrózió veszélye			Határérték saválló beton esetén
	Gyenge	Közepes	Erős	
pH-érték	6,5 – 5,5	5,5 – 4,5	4,5 – 4,0	≥ 3,5

A molaritás számszerűen azonos az anyagmennyiség-koncentrációval, de nincs mértékegysége, azaz nevezetlen szám, és annak kifejezője, hogy hányszor nagyobb, vagy hányszor kisebb az oldat anyagmennyiség-koncentrációja, mint 1,0 mol/dm^3, tehát a molaritás relatív anyagmennyiség-koncentráció.

Vizes oldatban egymás mellett csak hidroxilok és karbonátok, vagy hidrogén-karbonátok és karbonátok lehetnek jelen. Hidroxil (OH^-) és hidrogén-karbonát (HCO_3^-) egymás mellett nem lehet jelen, mert a következő reakció-egyenlet szerint a hidroxil és hidrogén-karbonát azonnal karbonáttá alakul:

$$OH^- + HCO_3^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O$$

Az MSZ EN ISO 9963-1:1998 szabvány szerint a víz lúgossága alapvetően a hidrogén-karbonát-, a karbonát-, a hidroxil-koncentráció valamint az egyéb pufferanyagok (X), mint például az ammóniák, borátok, foszfátok, szilikátok és szerves anionok függvénye.

- Az „összes" vagy metilvörös-, illetve metilnarancs-lúgosság (A_T-lúgosság, m-lúgosság) metilvörös- vagy metilnarancs- vagy keverék-indikátor alkalmazásával, vagy potenciometriás végpontjelzéssel – 4,5 pH-értékig – végzett titrálással megállapított lúgosság, amely a vízben lévő hidrogén-karbonát-, karbonát- és hidroxil-koncentráció egyenértékével fejezhető ki. Meghatározását az MSZ EN ISO 9963-1:1998 szabvány szerint kell végezni. Az összes lúgosság vagy m-lúgosság kémiai képlete:

$$A_T \approx 2c(CO_3^{2-}) + c(HCO_3^-) + c(OH^-) - c(H^+) + c(X)$$

ahol c a tömegkoncentráció;
X a pufferanyagok, mint például az ammónia, a borát, a foszfát, a szilikát és a szerves anionok jele.

- Az „összetett" vagy fenolftalein-lúgosság (A_p-lúgosság, p-lúgosság) fenolftalein-indikátor alkalmazásával, vagy potenciometriás végpontjelzéssel – 8,3 pH-értékig – végzett titrálással megállapított lúgosság, amelyet megállapodás szerint a vízminta összes hidroxil-koncentrációjának és a karbonát-koncentráció felének tekintenek. A meghatározásból következik, hogy a víz fenolftalein-lúgossága pH ≤ 8,3 esetén nulla. Meghatározása természetes és kezelt vizek, valamint szennyvizek esetén potenciometriás eljárással vagy vizuális titrálással az MSZ EN ISO 9963-1:1998 szabvány szerint történhet. A fenolftalein-lúgosság vagy p-lúgosság kémiai képlete:

$$A_p \approx c(CO_3^{2-}) - c(CO_2aq) + c(COH^-) - c(H^+) + c(X)$$

Az MSZ EN ISO 9963-2:1998 szabvány szerint a karbonát-lúgosság (A-lúgosság) alatt a víznek azt a képességét értik, hogy mennyi hidrogénionnal tud reagálni. A karbonát-lúgosságot gyakran „összes lúgosság"-nak is nevezik, és számszerű értéke megegyezik a metilvörös-, illetve metilnarancs-lúgosságéval. Meghatározását sósavas titrálással kell végezni. Az összes lúgosság vagy karbonát-lúgosság kémiai képlete:

$$A \approx 2c(CO_3^{2-}) + c(HCO_3^-) + c(OH^-) - c(H^+) + c(X).$$

A titráláskor a közömbösítésre elfogyott 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú sósav ml-einek száma a p és m lúgosság értékét mval/l-ben adja meg.

A lúgosság értékét szabványosan – egyértékű ionra számolva – H^+ mmol/dm^3, esetleg H^+ mmol/liter mértékegységben adják meg. A lúgosság szabványos mértékegységét (H^+ mmol/dm^3) más mértékegységekre a következőképpen kell átszámítani:

1,0 H^+ mmol/dm^3 = $CaCO_3$ 0,5 mmol/dm^3 =
$CaCO_3$ 50 mg/dm^3 (karbonát-lúgosság)

1,0 H^+ mmol/dm^3 = 2,8 nk° német keménységi fok

1,0 $CaCO_3$ mg/dm^3 = 0,0561 nk° német keménységi fok.

A víz lúgosságát titrálással az MSZ 448-11:1986 szabvány szerint is meg lehet határozni. A fogalom-meghatározás szerint a lúgosság a vízben lévő, savval reakcióba lépő anyagok összege, amely a titrálás végpontjának pH-értékétől függ. Értékét egyértékű ionra számolva mmol/dm^3-ben adjuk meg. A fenolftaleinlúgosság (p-lúgosság) a fenolftalein-indikátor alkalmazásával, vagy potenciometriás végpontjelzéssel pH = 8,3 értékig megállapított lúgosság; az összes vagy metilnarancs-lúgosság (m-lúgosság) a metilnarancs- vagy keverék-indikátor alkalmazásával, vagy potenciometriás végpontjelzéssel pH = 4,4 értékig megállapított lúgosság. A lúgosságot a következő képletekkel lehet kiszámítani:

p-lúgosság = $A \cdot f$ és m-lúgosság = $B \cdot f$

ahol A a vízminta titrálásakor a fenolftalein elszíntelenedéséig, illetve a 8,3 pH-érték eléréséig fogyott sósav, illetve kénsav mérőoldat térfogata cm^3-ben, B a vízminta titrálásakor a metilnarancs színátcsapásáig, illetve a 4,4 pH-érték eléréséig fogyott sósav, illetve kénsav mérőoldat térfogata cm^3-ben, az f pedig a sósav, illetve kénsav mérőoldat faktora.

A MSZ 448-11:1986 szabványban megjegyzik, hogy a p- és az m-lúgosság értékének ismeretében a víz hidrogén-karbonátion-, karbonátion- és hidroxilion-tartalma kiszámítható, ha az ivóvíz minőségű vízben más, lúgosságot okozó ion nincs. A szabvány a számításra táblázatot is tartalmaz.

Öllős et al. (2010) szerint a szennyvizek karbonát-lúgossága (A-lúgossága, összes lúgossága) 2000-4000 $CaCO_3$ mg/dm^3 között ingadozik, és a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. vizsgálati eredményei alapján a konyhai hulladékok pH-értéke mintegy 5,0 és karbonát-lúgossága ~1570 $CaCO_3$ mg/dm^3.

Érdekes a német „Lauge" és „Base"szavak értelmezése. A „Lauge" kifejezés a régebbi, és gyakran megtalálható a régi kémia könyvekben, mai értelmezés szerint lúgos kémhatású oldatot, folyadékot (pH > 7) jelent. „Base" alatt olyan anyagot (Protonenakzeptor) értenek, amely a reakció partnertől (Protonendonator) protont (H^+-iont) képes átvenni. Ha a „Base" oldat alakjában van jelen, akkor a neve „Lauge". Valamennyi „Lauge" egyben „Base" is, de nem minden

„Base” folyékony halmazállapotú, azaz „Lauge”. Például, ha vízbe ammóniát (NH_3) vezetünk, akkor ammóniumionok (NH_4^+) és hidroxilionok (OH^-) képződnek, ahol az NH_3 és az OH^- „Protonenakzeptor”, azaz lúg (Base), miközben az NH_4^+ és a H_2O „Protonendonator”, azaz sav (Säure): $NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$. Az ilyen reakciót németül „Protolytische Reaktion”-nak nevezik. Ezt a különbséget írja le *Arrhenius*, illetve *Brønsted-Lowry* sav-bázis elmélete.

4. A VÍZ KEMÉNYSÉGE

Biczók (1956, 1960) szerint a betonkorrózió veszélyességét nem lehet csupán a pH-érték stb. meghatározásával megállapítani, jelentősége van a karbonát-keménységnek is.

A víz keménységét fokban fejezik ki, és azt a vízben oldott alkáliföldfémionok (például kalcium, magnézium, bárium, stroncium) mennyisége határozza meg. A víz összes keménysége a változó és az állandó keménység összege. A *változó keménységet* karbonát-keménységnek is nevezik, és azt a vízben oldott kalcium-hidrogén-karbonát ($Ca(HCO_3)_2$) és magnézium-hidrogén-karbonát ($Mg(HCO_3)_2$) mennyisége határozza meg, amelyet ezért gyakran hidrogén-karbonát-keménységnek is neveznek (például a DIN 4030-2:2008 szabványban), és amely hatással van a víz pH-értékére. A karbonát-keménység forralással csökkenthető, mert forraláskor a hidrogén-karbonátok vízben oldhatatlan karbonátok formájában kiválnak.

Az **állandó keménységet a vízben oldott szulfátok (például kalcium-szulfát, $CaSO_4$; magnézium-szulfát, $MgSO_4$), kloridok (például kalcium-klorid, $CaCl_2$) és nitrátok (például kalcium-nitrát, $Ca(NO_3)_2$), egy szóval sók okozzák, amelyek a víz pH-értékére nincsenek hatással, mert a vizes oldatban lévő hidrogénionok mennyiségét nem befolyásolják, és amelyek a vízből forralás hatására sem válnak ki. Az állandó keménység az összes keménység és a változó keménység (karbonát keménység) különbsége mg/dm³ mértékegységben. Az állandó keménységet mmol/dm³ mértékegységben nem lehet megadni.

A víz keménységét ma a korábbi német, angol, francia, amerikai vízkeménységi fok helyett általában az SI mértékegység rendszerben a víz alkáliföldfémion-tartalmával CaO mg/dm³ vagy mol/dm³, vagy kis koncentráció esetén mmol/dm³ mértékegységben fejezik ki. 1,0 CaO mg/dm³ 0,0179 Ca^{2+} mmol/dm³-nek felel meg.

Magyarországon a vízkeménység jellemzésére többnyire a német keménységi fokot használták. Jele Magyarországon: nk°, német nyelvterületen: °dH. A víz 1,0 nk° keménységű, ha 10 mg/dm³ kalcium-oxiddal (CaO) egyenértékű kalciumvegyületet vagy 7,19 mg/dm³ magnézium-oxiddal (MgO) egyenértékű magnéziumvegyületet tartalmaz. A kalcium-oxid relatív molekulatömege 40,08 + 16,00 = 56,1/mol, amiből a moláris tömeg 56,1 g/mol = 56,1 mg/mmol. Az egy dm³ vízben lévő 10 mg kalcium-oxid 10/56,1 = 0,178 mmol-nak felel meg, tehát 1 nk° = 0,178 mmol/dm³ és 1,0 mmol/dm³ = 5,61 nk°. Magnézium-oxid esetén ugyanerre az eredményre jutunk, ugyanis a magnézium-oxid relatív molekulatömege 24,30 + 16,00 = 40,3 g/mol és moláris tömege 40,3 mg/mmol. Az egy dm³ vízben lévő 7,19 mg magnézium-oxid 7,19/40,3 = 0,178 mmol-nak felel meg, azaz 1,0 nk° = 0,178 mmol/dm³.

Az 1,0 °fH francia keménységi fokú víz 10 mg/l kalcium-karbonátnak ($CaCO_3$) megfelelő mennyiségű kalcium- és magnéziumvegyületet tartalmaz. A kalcium-karbonát relatív molukulatömege: 40,08 + 12,01 + 3·16,0 = 100,1/mol, amiből a moláris tömeg 100,1 g/mol = 100,1 mg/mmol. Az egy dm³ vízben lévő 10 mg kalcium-karbonát 10/100,1 = 0,100 mmol-nak felel meg, tehát 1,0 °fH = 0,100 mmol/dm³ és 1,0 mmol/dm³ = 10,00 °fk, továbbá 1,0 °fH = 0,561 °dH.

A víz 0–4 nk° között nagyon lágy, 4–8 nk° között lágy, 8–18 nk° között közepesen kemény, 18–30 nk° között kemény, 30 nk° felett nagyon kemény.

Az SI mértékegység-rendszerhez igazodva a víz keménységének a mértékét újabban mmol/dm³ függvényében is ki szokták fejezni:

- a víz lágy, ha az alkáliföldfémion-tartalom 0-1,25 mmol/dm³ (0-7 nk°);
- kissé kemény, ha az alkáliföldfémion-tartalom 1,25-2,50 mmol/dm³ (7-14 nk°);
- kemény, ha az alkáliföldfémion-tartalom 2,50-3,75 mmol/dm³ (14-21 nk°) és
- nagyon kemény, ha az alkáliföldfémion-tartalom 3,75-5,00 mmol/dm³ (21-28 nk°).

Svájcban például kicsinek általában a $\leq$ 1,5 mmol/dm³, azaz a $\leq$ 8,41 °dH vízkeménységet, nagynak általában a >1,5 mmol/dm³, azaz a > 8,41 °dH vízkeménységet tekintik.

Az esővíz keménysége általában (2 – 3) nk°, tehát az esővíz nagyon lágy víz. **A vízellátásban a nagyon kemény vizet központilag szokták lágyítani.**

Biczók (1956, 1960) szerint, ha a vízben egyidejűleg többféle agresszív ion van jelen, akkor azok hatását súlyozottan kell figyelembe venni:

- *Kis karbonát-keménység és savhatás* esetén elég a pH-érték alapján értékelni, mert a savasság rendszerint igen kis karbonát-keménységgel párosul. Ez fordítva nem áll fenn, mert a víz kis karbonát-keménységével nem jár együtt a savasság. A kis karbonát-keménység a beton kilúgozódását okozza.
- *Kis karbonát-keménység, sav- és szénsavhatás* jelenlétekor a pH-értéket a szabad CO_2 tartalom szabja meg, ha a víz más savat nem tartalmaz. Helyes, ha egyidejű kilúgozó és savhatás esetén a pH-érték és a szabad CO_2 tartalom közül a nagyobb agresszív hatású tényezőt vesszük figyelembe.
- *Nagyobb karbonát-keménység és szabad CO_2* tartalom esetén a pH-érték szintén alacsony lehet. Az agresszivitás fokát ilyenkor ezért helyesebb a szénsavhatás alapján kiértékelni.
- *Kis karbonát-keménység, sav, szénsav és szulfátionok* jelenlétében az agresszivitási fok megállapítása igen nehéz. A beton szulfátos korróziója lehetséges. A kis karbonát-keménységű és szabad savat tartalmazó víz nagyobb agresszivitású, ha szulfátot is tartalmaz, ugyanígy a szulfátos víz agresszivitása is nagyobb, **ha egyidejűleg savakat is tartalmaz**, vagyis a négy hatás egyidejű fellépése esetén az oldatot a betonra agresszívebbnek kell minősítenünk, mint az egyes hatások esetében külön-külön.
- *Kis karbonát-keménység, sav, szénsav, magnéziumion.* A magnéziumkorrózió a savas kilúgozó korrózióhoz hasonlít. A magnéziumkorrózió az első három tényező hatását fokozza, ezért a hatások összegezendők. Ha például a karbonát-keménység és a szénsav hatására a korrózió „közepes”, a magnézium hatására pedig „gyenge”, az agresszivitás végeredményben „jelentős” (*Biczók* 1956, 1960).

Biczók a vizet keménység szerint a *4. táblázat* szerint, a Cemsuisse-Merkblatt MB 01:2010 az *5. táblázat* szerint jellemezte.

Kemény, kalcium dús vízben a mész sók kevésbé oldódnak, ezért olyan vízben, amelynek összes keménysége 24° felett van, ritkán fordul elő komolyabb betonkorrózió (*Biczók* 1956, 1960).

A Cemsuisse-Merkblatt MB 01:2010 svájci műszaki

4. táblázat: *A víz jellemzése keménység szerint (Biczók, 1956, 1960)*

A víz jellemzése keménység szerint	Karbonát-keménység	Összes keménység
	német keménységi fokban (nk°)	
Igen lágy		0-4
Lágy	< 6	4-8
Közepesen kemény	6-15	8-12
Elég kemény		12-18
Kemény	15-24	18-25
Igen kemény	24-30	25-50
Rendkívül kemény	> 30	> 50
Megjegyzések: - 1,0 német keménységi foknak 1,0 dm^3 vízben oldott 10 mg kalcium-oxid (CaO) vagy ezzel egyenértékű kalcium vagy magnézium vegyület felel meg. - Az esővíz összes keménysége általában (2 – 3) nk°, tehát az esővíz nagyon lágy víz, és betonkorróziót okozhat.		

5. táblázat: *A betonkorrózió kockázata a Cemsuisse-Merkblatt MB 01:2010 műszaki irányelv szerint*

Kockázati osztály	A (kisebb)	B (közepes)	C (nagyobb)
Vízkeménység, mmol/dm^3	> 1,5 (8,4 nk°)	> 1,5 (8,4 nk°) vagy ≤ 1,5 (8,4 nk°)	≤ 1,5 (8,4 nk°)
Megjegyzés: A német keménységi fokot (nk°) SI mértékegységre a következők szerint kell átszámítani: 1,0 nk° = **0,1783** mmol/dm^3.			

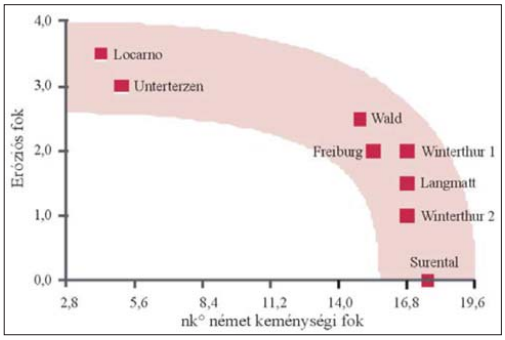
irányelv szerint a vízkeménység a mész-szegény területeken általában kicsi (≤ 1,5 mmol/dm^3), és rövid ideig kicsi lehet kiadós eső után. Ha a vízkeménység kicsi, akkor a szennyvíznek a betonfelületi kalcium-karbonát védőréteg kialakításához szükséges hidrogén-karbonát-tartalma is kicsi.

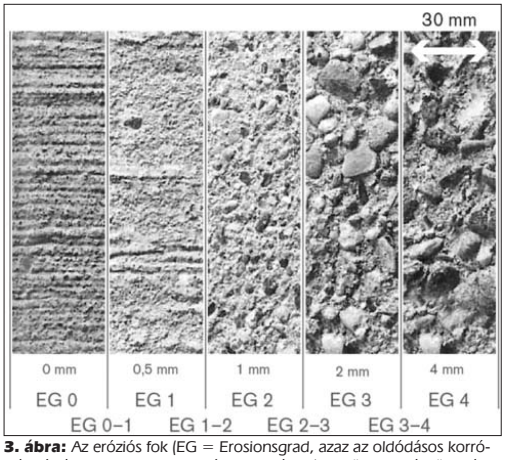
A svájci műszaki irányelvben a kopást is magába foglaló oldódásos korrózió mértékének jellemzésére ún. „eróziós fokozatokat" (EG = Erosionsgrad) vezettek be. Svájci mérések azt mutatják, hogy a szennyvíz keménységének növekedésével a betonerózió csökken, a 14-18 nk° német keménységi fok tartományában lineáris összefüggés mutatkozik a vízkeménység és az eróziós fok között (*2. ábra*). Az eróziós fokot Svájcban a felületi kopás (oldódási mélység) függvényében a *3. ábra* szerint értelmezik (*Huggenberger*, 2010; Cemsuisse-Merkblatt MB 01:2010).

A víz keménységét például az MSZ 448-21:1986, a DIN 4030-2:2008 vagy az ASTM D 1126:2012 szabvány szerint lehet meghatározni.

Az MSZ 448-21:1986 szabvány megkülönbözteti az összes, a karbonát- és a nemkarbonát-keménységet; összes keménység alatt a víz kalcium-oxid egyenértékben kifejezett kalcium- és magnézium-koncentrációját érti; a vízben oldott kalcium- és magnéziumionoknak a hidrogén-karbonát- és karbonátionokhoz rendelhető részét karbonát-keménységnek (változó keménységnek), az egyéb anionokhoz (például klorid, szulfát, nitrát stb.) rendelhető részét nemkarbonát-keménységnek (állandó keménységnek) tekinti.

2. ábra: *Összefüggés a szennyvíz keménysége és beton eróziós foka között (Huggenberger, 2010; Cemsuisse-Merkblatt MB 01:2010)*





3. ábra: *Az eróziós fok (EG = Erosionsgrad, azaz az oldódásos korrózió mértéke a mechanikai kopást is beleértve) a felületi kopás függvényében (Huggenberger, 2010; Cemsuisse-Merkblatt MB 01:2010)*

Az összes keménységet eriokrom-fekete T-indikátor jelenlétében, 9,5-10,0 pH-tartományban való titrálással, etilén-diamin-tetraecetsav (EDTE) mérőoldat alkalmazásával határozzuk meg. Az összes keménységet CaO mg/dm^3 mértékegységben a

$$c_{ÖK} = f \cdot a \cdot (1000/\text{vízminta térfogata cm}^3\text{-ben})$$

képlettel kapjuk meg, ahol „*f*" az EDTE-mérőoldat kalcium- vagy magnézium-alapoldatra beállított faktora és „*a*" az EDTE-mérőoldat fogyása cm^3 mértékegységben.

Az MSZ 448-21:1986 szabvány szerint az összes keménység ($c_{ÖK}$) a kalciumion-koncentráció (cCa^{2+}) és a magnéziumion-koncentráció (cMg^{2+}) ismeretében CaO mg/dm^3 mértékegységben a következő képlettel is kiszámítható:

$$c_{ÖK} = 1{,}40 \cdot cCa^{2+} + 2{,}33 \cdot cMg^{2+}$$

ahol 1,40 a CaO/Ca átszámítási faktor és 2,33 a CaO/Mg átszámítási faktor.

A karbonát-keménység CaO mg/dm^3 mértékegységben a

$$c_{KK} = 28 \cdot a$$

összefüggésből adódik, ahol 28 = 56/2 mg/mmol a kalcium-oxidra való átszámítási tényező és „*a*" a víz MSZ 448-11:1986 szabvány szerinti lúgossága mmol/dm^3 mértékegységben.

A nemkarbonát-keménységet az összes keménység és a karbonát-keménység különbségeként kapjuk meg.

A DIN 4030-2:2008 szabvány szerint az alkáliföldfém-keménységet – amely annyiban tér el a karbonát-keménységtől, hogy abba az alkáliföldfémek közül a stroncium és a bárium adta keménységet is beszámítják – pH = 10 értékre beállított vízmintán, etilén-diamin-tetraecetsav (EDTE) mérőoldat **segítségével titrálással, az EDTE-oldat felhasz**nálásból kell meghatározni. A német szabványban hidrogén-karbonát-keménységnek nevezett karbonát-keménység a tiszta vízszüredék 100 cm^3 térfogatú részének 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú sósav mérőoldattal, pH = 4,3 értékig való titrálásával határozható meg. A keménységet CaO mg/dm^3 vagy mmol/dm^3 mértékegységben kell megadni.

Minthogy a CaO molekulatömege 56 g/mol, 10 mg/dm^3 CaO-keménység 10/56 = 0,179 mmol/dm^3 CaO-keménységnek (a német szabvány szerint alkáliföldfém-keménységnek) felel meg, és 10 mg/dm^3 CaO-hidrogén-karbonát-keménység ennek kétszeresével, 0,357 mmol/dm^3 hidrogén-karbonát-keménységgel egyenértékű.

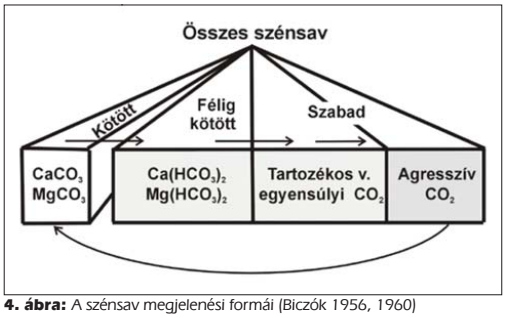
Az ASTM D 1126:2012 szabvány alapján a tiszta, vegyszerektől mentes, kalciumot vagy magnéziumot tartalmazó vizek keménységét lehet titrálással meghatározni. A vizsgálati eljárás alsó felismerési határa megközelítőleg 2-5 $CaCO_3$ mg/dm^3; a felső határ a vízminta hígításával minden koncentráció esetén beállítható. A módszerrel meg lehet különböztetni a kalciumionok okozta és a magnéziumionok okozta keménységet. A szabvány bevezetőjében említik, hogy a sók gyakran okoznak a vízvezetékekben vízkövesedést, amely azok meghibásodásához vezet. A keménységet sokféle kation okozhatja, de a kalcium- és magnéziumionok kivételével általában csak nyomokban találhatóak a vízben. A keménység fogalmát eredetileg azokra a vizekre alkalmazták, amelyekkel nehéz volt ruhát mosni, tehát azokra, amelyeknek nagy a kalcium- és magnéziumion tartalma.

5. A SZABAD SZÉNDIOXID, SZABAD SZÉNSAV

A vízben a szénsav kötött, félig kötött és szabad formában van jelen (*Biczók*, 1956, 1960). A víz szabad szénsav-tartalma (szabad széndioxid-tartalma) a kalcium-hidrogén-karbonát ($Ca(HCO_3)_2$) és magnézium-hidrogén-karbonát ($Mg(HCO_3)_2$) oldatban tartásához szükséges egyensúlyi (tartozékos) széndioxid és az agresszív széndioxid mennyiségének összege (*4. ábra*). Ha összeadjuk a szabad széndioxid ($H_2CO_3^*$), a félig kötött hidrogénkarbonátion (HCO_3^-) és a kötött karbonátion (CO_3^{2-}) CO_2-tartalmának koncentrációját moláris alapon, akkor megkapjuk a vízben lévő összes CO_2-koncentrációját (*Wisotzky*, 2011).

Korróziós hatása az agresszív szénsavnak (széndioxidnak) van (*Hunkár*, 1940; *Biczók*, 1956, 1960).

Zárt rendszerben, amelyben a légnemű anyagok cseréje nem jön létre, ahogy ez a mélyebben lévő talajvizek esetén feltételezhető, az összes széndioxid-tartalom lényegében állandó, és megoszlik a különböző CO_2-fajták között. A kapilláris vizek tartományának nyílt rendszerében vagy a talajvizek légkörrel



4. ábra: A szénsav megjelenési formái (Biczók 1956, 1960)

kapcsolatban álló felülete közelében az összes széndioxid-tartalom változik, általában növekszik, és a változás a pH-értéktől, valamint a mindenkori uralkodó CO_2 résznyomástól függ (*Wisotzky*, 2011).

A szénsav (H_2CO_3) a széndioxid (CO_2) és a víz (H_2O) reakciójának terméke, aminek következtében a szénsav kifejezést sok esetben a széndioxid szinonimájaként használják. A széndioxid vízben viszonylag jól oldódik, **és a vízzel a hő**mérséklettől függő mértékben, szénsavat képez:

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

A következő reakció-egyenlet szerint a szénsavban a vízben oldott széndioxidnak csak 0,2%-a jelenik meg (*Wisotzky*, 2011):

$$K_K = \frac{[H_2CO_3]}{[CO_2]} = 2 \cdot 10^{-3}$$

A szénsav (H_2CO_3) a vízben disszociál, azaz hidrogén-karbonátionra (HCO_3^-) és hidroxóniumionra (más néven: hidróniumionra, oxóniumionra: H_3O^+) bomlik:

$$H_2CO_3 + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H_3O^+$$

általános alakban:

$$sav + H_2O \rightleftharpoons lúg + H_3O^+$$

és ez a folyamat egy kémiai egyenletbe összevonva azt fejezi ki, hogy mind a CO_2, mind a H_2O kész egy protont (hidrogént) felvenni:

$$CO_2 + 2 \cdot H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + HCO_3^-$$

Ha a szénsavas egyenletben gondolatban elvonatkoztatunk a víztől és a hidroxóniumiontól (H_3O^+), akkor megmarad a szénsav (H_2CO_3) és a hidrogén-karbonátion (HCO_3^-), amelyek anyagmennyiségének koncentrációja (*c*) egyensúlyban van. Ha a szénsav (H_2CO_3) hajlama a proton (hidrogén) leadásra erős – pK_S-értéke kicsi – és a hidrogén-karbonátion (HCO_3^-) hajlama gyenge – pK_B-értéke nagy – a proton felvételére, akkor a szénsav erős sav.

Víz esetén az egyensúlyi egyenlet:

$pK_W = pK_S + pK_B = -\lg K_S - \lg K_B = 14$, mert: $pK_S = -\lg K_S$ és $pK_B = -\lg K_B$,

továbbá:

$K_W = K_S \times K_B = 10^{-14}$ mol²/dm⁶,

ahol *K* a kémiai egyensúlyi állandó, amely a kémiai reakcióban résztvevő anyagok mennyiségének azt a viszonyát fejezi ki, amely mellett az egyensúly folytán kémiai reakció létrejötte energetikailag lehetetlen. **A víz kémiai egyensúlyi állandójának** (K_W) mértékegysége: mol²/dm⁶, a savé (K_S) és a lúgé (K_B): mol/dm³.

A pK_S-érték egyenlete a reakcióban részvevő anyagok mennyiségének *c* [mol/dm³] koncentrációjával kifejezve:

$$pK_S = -\lg K_S = -\lg\left(\frac{c(H_3O^+)\cdot c(HCO_3^-)}{c(H_2CO_3)}\cdot(1{,}0\ \frac{dm^3}{mol})\right)$$

A víz c(H_2O) anyagmennyiség-koncentrációja azért nem szerepel szorzóként a nevezőben, mert az gyakorlatilag konstans ($c(H_2O)$ = 55,56 mol/dm³), és ezért számértékét a *K* kémiai egyensúlyi állandóba bevonják, de emiatt a pK_S-érték nevezetlen szám volta nem változhat.

Az anyagmennyiség-koncentrációja (*c*) alatt az anyagmennyiség (*n*) és az össztérfogat ($V_{összes}$) hányadosát értik, amely gyakorlatilag a részecskék (atomok és molekulák) *Avogadro*-állandóval ($N_{Avogadro}$) osztott térfogategységre eső számával ($N/V_{összes}$) egyenlő (DIN 1310:1984, DIN EN ISO 80000-9:2017):

$$c = \frac{n}{V_{összes}} = \frac{N}{V_{összes}\cdot N_{Avogadro}}$$

Az anyagmennyiség koncentrációjának (*c*) SI mértékegysége mol/m³, gyakorlati mértékegysége mol/dm³.

A sav erősségét a savállandó, azaz a pK_S-érték fejezi ki, értéke minél kisebb, az anyag annál erősebb sav. Az anyag lúgossága mértékének kifejezője a pK_B-érték mint lúgállandó, értéke minél kisebb, az anyag annál erősebb lúg (*6. táblázat*).

A szénsav vízben való disszociálását tekintve:

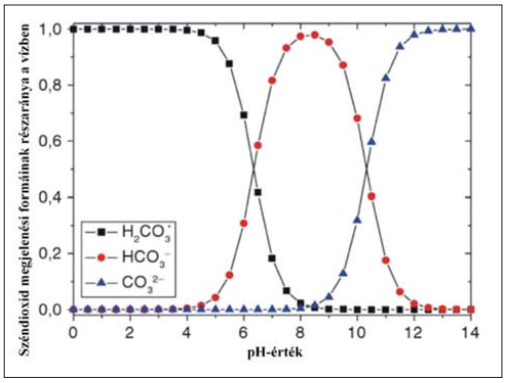
sav + $H_2O \rightleftharpoons H_3O^+$ + lúg

pK_S = 6,52, tehát a szénsav (H_2CO_3) közepesen erős sav, és pK_B = 7,48, tehát a hidrogén-karbonátion (HCO_3^-) közepesen erős lúg (http://www.chemie.de/lexikon/Säurekonstante.html).

A pK_S-érték, illetve pK_B-érték és pH-érték **között az a különbség**, hogy míg a pK_S-érték és a pK_B-érték anyagjellemző, addig a pH-érték csak az oldatban lévő H^+ ionok koncentrációját írja le, függvénye az oldat hígításának, és az anyag savasságának mértékéről közvetlenül nem ad tájékoztatást.

A vizekben a szénsav kalcium-karbonát ($CaCO_3$) és magnézium-karbonát ($MgCO_3$) alakjában kötött formában, kalcium-hidrogén-karbonát ($Ca(HCO_3)_2$) és magnézium-hidrogén-karbonát ($Mg(HCO_3)_2$) félig kötött formában és szabad szénsav (széndioxid, CO_2) formájában lehet jelen.

A szénsav képződése és disszociációja a pH-értéktől függ



5. ábra: *A széndioxid megjelenési formáinak, a szabad szénsavnak ($H_2CO_3^*$), a félig kötött hidrogén-karbonátionnak (HCO_3^-) és a kötött karbonátionnak (CO_3^{2-}) részaránya a vízben a pH-érték függvényében (Wisotzky, 2011)*

(*5. ábra*); ha a pH-érték csökken, akkor több a hidrogénion (H^+) és a széndioxid (CO_2); ha a pH-érték növekszik, akkor kevesebb a hidrogénion (H^+) és több a karbonátion (CO_3^{2-}) és bizonyos határig a hidrogén-karbonátion (HCO_3^-). Ha a pH-érték 4,3 alatt van, akkor kizárólag szénsav ($H_2CO_3^*$) – mint egyetlen széndioxid fajta – van a vízben, a karbonátionok (CO_3^{2-}) gyakorlatilag csak pH = 8,2 felett jelennek meg. A talajvizek esetén gyakori 4,3 és 8,2 pH-érték között szénsav ($H_2CO_3^*$) és hidrogén-karbonát (HCO_3^-) is van megfelelő részarányban a vízben. Megfigyelhető, hogy a szabad szénsav (széndioxid) anyagmennyiség koncentrációjának csökkenése növekvő hidrogén-karbonát koncentrációval felgyorsul (*Wisotzky* 2011).

Megjegyzés: $H_2CO_3^*$ a vízben oldott széndioxid és tényleges szénsav együttesének jele.

A logaritmikus ordinátájú *6. ábrán* 1,0 mmol/dm³ összes széndioxid-koncentrációja látható. Más összes széndioxid-koncentrációnál a széndioxid-fajták görbéinek abszcissza-menti elhelyezkedése (méretaránya) megmarad, de a mindenkori összes széndioxid-koncentrációnak megfelelően a görbék magassága (méretaránya) az ordináta-mentén megváltozik. A *6. ábrán* kitűnik, hogy a vízben pH < 6,3 (pH < pK_1) esetén a szabad szénsav (H_2CO_3), 6,3 és 10,2 közötti pH-érték esetén (pK_1 < pH < pK_2) a félig-kötött hidrogén-karbonátion (HCO_3^-), és 10,2 pH-érték felett (pH > pK_2) a kötött karbonátion (CO_3^{2-}) van döntő többségben (*Zühlke*, 2016).

Az *5.* és *6. ábra* elkészítését az tette lehetővé, hogy valamely vizes oldat koncentrációja és pH-értéke között összefüggés áll fenn, az összefüggés gyenge savak – mint amilyen a szénsav – esetén a következő:

$$K_S = \frac{[H^+]\cdot[A^-]}{[HA]} = \frac{[H^+]^2}{c - [H^+]},$$

amely matematikai formában:

6. táblázat: *A savasság és lúgosság mértéke (http://www.chemie.de/lexikon/Säurekonstante.html)*

Savasság mértéke	pK_S	pK_B	Lúgosság mértéke
Nagyon erős sav	(-10) – (-2)	16 - 24	Nagyon gyenge lúg
Erős sav	(-2) – 4	10 - 16	Gyenge lúg
Közepesen erős sav	4 – 9	5 – 10	Közepesen erős lúg
Gyenge sav	9 – 15	(-1) – 5	Erős lúg
Nagyon gyenge sav	15 – 34	(-20) – (-1)	Nagyon erős lúg

$$y = \frac{x^2}{c - x}$$

és

$pH = - lg[H^+]$,

amely matematikai formában:

$pH = - lgx$, illetve $x = 10^{-pH}$

és ezekből:

$$K_s = \frac{10^{-2 \cdot pH}}{c - 10^{-pH}},$$

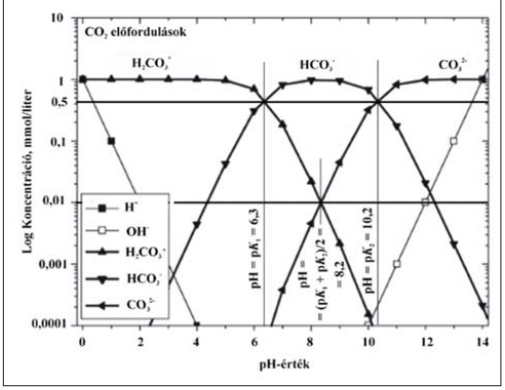
ahol:

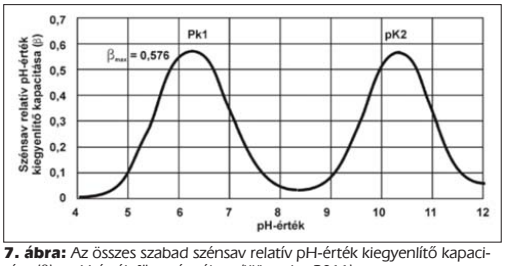
K_s = y = savállandó, a sav disszociációs állandója, mol/dm^3
$[H^+]$ = x = hidrogénion-koncentráció, mol/dm^3
$[A^-]$ = savmaradék-koncentráció, mol/dm^3
[HA] = sav-koncentráció, mol/dm^3
c = az oldat koncentrációja, mol/dm^3

A tartozékos vagy egyensúlyi szén-dioxidot tartalmazó víz tulajdonképpen kiegyenlítő- vagy pufferoldat. Kiegyenlítő- vagy pufferoldatnak az olyan oldatokat nevezik, amelyek gyenge savat – amely kismértékben disszociál –, és annak erős bázissal alkotott sóját – amely gyakorlatilag teljesen disszociál – (vagy gyenge bázist, és annak erős savval alkotott sóját) együtt tartalmazzák, és kiegyenlítik a pH megváltozására irányuló külső hatásokat, és ezekkel szemben a pH-t megközelítőleg állandó értéken tartják. A kiegyenlítő-képesség mértéke a kiegyenlítő- vagy pufferkapacitás (β), amely erős savaknak, illetve bázisoknak azon mennyisége, amely a pufferoldat pH-ját 1,0 egységgel változtatja meg.

A vízben oldott szénsav fajták képesek savak vagy lúgok hozzáadása esetén a pH-értéket kiegyenlíteni (pufferelni). A pH-érték kiegyenlítő-kapacitás (β) az összes széndioxid mennyisége mellett elsősorban a víz pH-értékétől függ. Az összes szabad szénsav relatív pH-**érték kiegyenlítő kapacitása** a pH-érték függvényében *7. ábrán* látható. Két-protonos savként a szénsavnak két pH-érték kiegyenlítő képességi határértéke van (*Wisotzky* 2011). A pH-érték kiegyenlítő képesség fennáll mind a két, a pK1 és pK2 savállandó tartományában, ami azt jelenti, hogy pH = 6,3 és pH = 10,3 értéknél éri el maximumát, amelynek értéke $\beta_{max} \cdot$(összes szabad CO_2) = 0,576·(összes CO_2) mmol/dm^3 (*6.* és *7. ábra*).

6. ábra: *A széndioxid megjelenési formáinak, a szabad szénsavnak ($H_2CO_3^*$), a félig kötött hidrogén-karbonátionnak (HCO_3^-) és a kötött karbonátionnak (CO_3^{2-}) a részaránya 1,0 mmol/dm^3 összes széndioxid-koncentrációjú* **vízben, logaritmikus léptékben, a pH-érték függvényében** *(Wisotzky, 2011; Zühlke, 2016).*





7. ábra: *Az összes szabad szénsav relatív pH-érték kiegyenlítő kapacitása (β) a pH-érték függvényében (Wisotzky, 2011)*

Ha a talajvíz vezető rétegnek kalcium- és/vagy magnézium-karbonát tartalma van, akkor ezeknek az ásványoknak a kötött CO_2-előfordulások mellett savkiegyenlítő képességük is van. Ebben az esetben az összes pH-érték kiegyenlítő kapacitás egyenlő a talajvíz pH-érték kiegyenlítő kapacitásának és a talajvíz vezető réteg pH-érték kiegyenlítő kapacitásának összegével. Így a 7 mmol/dm^3 hidrogén-karbonát koncentrációjú, mintegy 6,3 pH-értékű talajvíz pH-érték kiegyenlítő-kapacitása 4 pH-értékig 7-8 mmol/dm^3.

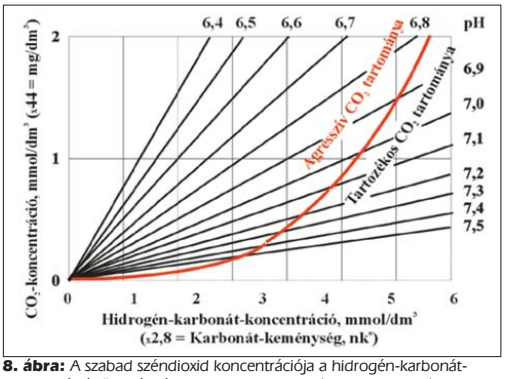
A nagy kalciumtartalmú talajvíz vezető réteg nagy pH-**ér**ték kiegyenlítő-kapacitása esetén nem tapasztalható a talajvíz savanyodása a savas esőkkel bevitt savak és az NH_4^+-ionok nitrifikációja ellenére sem. Ennek ellenkezője áll fenn, illetve a talajvíz savanyodása mérsékelt a kalciumot nem tartalmazó és csak szilikátos pH-érték kiegyenlítő kapacitással rendelkező, illetve a kis kalcium-tartalmú talajvíz vezető rétegek esetén. Például a 0,4 porozitású, 10% kalcium-karbonát tartalmú talajvíz vezető réteg pH-kiegyenlítő kapacitása 7940 mmol/dm^3, és 1,0 dm^3 talajvíz mintegy 3975 g talajvíz vezető réteggel áll egyensúlyi cserereakcióban.

Biczók (1956, 1960) írja, hogy a hőmérséklet emelkedésével a kémiai reakciók sebessége, így az agresszív víz káros vegyi hatása is rohamosan növekszik. Ezt meleg vizű források, ipari meleg vizek vezetékei stb. környékén figyelembe kell venni. Határértékként a különböző irodalmi források és előírások a 40-50 °C hőmérsékletet szokták megjelölni. Megemlítendő, hogy a meleg víz – némileg kisebb viszkozitása folytán – könnyebben mozog a talaj és a beton kapillárisaiban. Ezen kívül a kötött talajok hidegebbek, mint a szemcsés talajok, ezért a kötött talajok ebből a szempontból is kevésbé korrózióveszélyesek.

A *8. ábra* a szabad CO_2-előfordulások *Tillmanns*-féle kalcium-szénsav egyensúly függvényét ábrázolja (*Tillmanns* et al., 1912). A görbe minden pontjához egy meghatározott pH-érték tartozik. Emelkedő HCO_3^--koncentráció esetén a szabad CO_2 egyensúlyi koncentrációja is növekszik, miközben a pH-érték csökken. Így a kalcium-szénsav egyensúlyban lévő kemény vizek a lágy vizekhez képest egyre nagyobb $CO_{2,összes}$-koncentrációt és nagyobb pH-érték kiegyenlítő kapacitás mellett kisebb pH-értéket mutatnak.

Ha a vízminta vizsgálati eredménye a kalcium-szénsav egyensúlyi görbe felett fekszik, akkor nem csak tartozékos (egyensúlyi) széndioxid-tartalma, hanem agresszív széndioxid-tartalma is van. Ha a **vízminta vizsgálati eredménye a kalci**um-szénsav egyensúlyi görbe alatt fekszik, akkor az oldatnak kalcium többlete van, amelyből a kalcium-karbonát kiválik.

A kalcium-karbonát kiválására szemléletes példa a foko-



8. ábra: *A szabad széndioxid koncentrációja a hidrogén-karbonát-koncentráció függvényében Tillmanns szerint (Wisotzky, 2011)*

zott vízkőképződés a hévízkutak, így például a mezőkövesdi Zsóry-fürdő kútjainak termelőcsöve falán és a csövek mögötti rétegekben (*9. ábra*). A Zsóry-fürdő gyógyvizének összes oldott ásványi anyag tartalma 3500-3900 mg/dm^3, kalciumion-tartalma 370 mg/dm^3, szabad széndioxid-tartalma 965 mg/dm^3, kötött széndioxid-tartalma 585 mg/dm^3 (Miskolci Egyetem, 2009), kútjaiban képződő halványszürke színű vízkő kalcium-karbonát tartalma mintegy 96 tömeg% (*Bán*, 1995).

A 34-40 ºC hőmérsékletű karbonátos hévíz a felszínhez közeledve széndioxid-tartalmának egy részét elveszti, így a hévíz kalcium-karbonátra túltelítetté válik, és a maradék tartozékos széndioxiddal egyensúlyra törekedve, a többlet kalcium-karbonátot leadja (*Bán*, 1986).

A *Tillmanns*-féle kalcium-szénsav egyensúlyi görbét a következő egyenlet írja le (*Hölting et al, 2013.*):

$$c_{egyensúlyi}(CO_2) = \frac{KS_2 \cdot c(Ca^{2+}) \cdot c(HCO_3^-)^2}{KS_1 \cdot c(Ca^{2+}) \cdot c(CO_3^{2-})}$$

ahol KS_1 és KS_2 a kalcium-szénsav reakció egyensúlyi állandói, amelyek értéke egyébként a hőmérséklettől és az ionerősségtől függ:

$$KS_1 = \frac{c(H^+) \cdot c(HCO_3^-)}{c(CO_2)} = 10^{-6,37} \quad mol/dm^3$$

$$KS_2 = \frac{c(H^+) \cdot c(CO_3^{2-})}{c(HCO_3^-)} = 10^{-10,33} \quad mol/dm^3$$

A mol/dm^3 mértékegységben kifejezett ionerősség (μ) az egyes c(i) ionkoncentrációk és a mértékegység nélküli z(i) elektromos töltésszámok négyzete szorzata összegének a fele:

$$\mu = 0,5 \cdot \sum c(i) \cdot z(i)^2 \quad mol/dm^3$$

Például a 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú szénsav-oldat (H_2CO_3) ionerőssége:

$$\mu = 0,5 \cdot (2 \cdot c(H^+).z(H^+)^2 + c(CO_3^{2-}).z(CO_3^{2-})^2 = 0,5.(2 \cdot 0,1 \cdot (+1)^2 + 0,1 \cdot (-2)^2) = 0,3 \ mol/dm^3$$

A világhálón számos – főleg akvaristák által készített – táblázatot lehet találni, amelyekben a pH-érték és a változó keménység (karbonát-keménység) függvényében megadják a 20 ºnk német keménységi foknál lágyabb vizek szabad széndioxid-tartalmát általában mg/dm^3 mértékegységben *(7. táblázat)*.

A víz szabad széndioxid-tartalma a betonra kémiailag akkor agresszív, ha mennyisége meghaladja az oldott kalcium-hidro-



9. ábra: *Zsóry-fürdőben eltávolított vízkőkiválás (A fényképet Szakáll Sándor, a Miskolci Egyetem Ásvány- és Kőzettani Intézeti Tanszékének vezetője bocsátotta rendelkezésünkre)*

karbonát ($Ca(HCO_3)_2$)-koncentrációjának megfelelő egyensúlyi szénsav mennyiséget. Ellenkező esetben a vízből mész válik ki mindaddig, amíg a kalcium-hidrokarbonát-koncentráció az egyensúlyi szénsavnak megfelelő mértékre le nem csökken (*Biczók*, 1956, 1960). A víz, talajvíz, talaj (talajnedvesség) szabad szénsav-tartalmának (H_2CO_3) agresszivitása abban nyilvánul meg, hogy az agresszív széndioxid a beton kötőanyagának kationjait (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}) oldatba viszi; hideg víz esetén is könnyen oldódó hidrokarbonátot hoz létre, amely igen könnyen kilúgozódik, például:

$$CaCO_3(s) + H_2CO_3^* = CaCO_3(s) + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2 \cdot HCO_3^- = Ca(HCO_3)_2$$

Megjegyzés: Az (s) → (solid) a kémiában a szilárd halmazállapot jele.

A folyamat még bonyolultabbá válik, amikor a keletkezett kalcium-hidrokarbonát a beton kötőanyagának kalcium-hidroxidjával lép reakcióba, mert ekkor a kalcium-karbonát kicsapódik, a felszabaduló lágy víz pedig újra kalcium-hidrokarbonátot oldhat fel, és az egész folyamat kezdődik elölről:

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 = 2 \cdot CaCO_3(s) + 2 \cdot H_2O$$

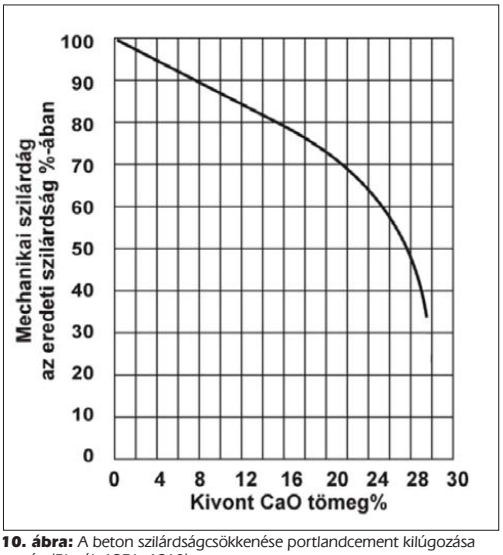
$$CaCO_3(s) + CO_2 + H_2O = Ca(HCO_3)_2$$

Bár a keletkező kalcium-karbonát a beton pórusait időlegesen eltömi, az agresszív széndioxid a kalcium-karbonát újból bekövetkező feloldása folytán a beton nagymértékben kilúgozódik, és a cementkő, illetve a beton szilárdsága jelentősen csökken *(10. ábra)*. A CaO fokozatos kivonásakor a szilárdságcsökkenés kezdetben lassú, de később a pusztulás erősen felgyorsul, például 5% CaO kilúgozása után a szilárdság mindössze 7%-kal csökken, míg 24% vagy ennél nagyobb mennyiségű CaO kilúgozása már ennek a szilárdságcsökkenésnek többszörösét okozza. Portlandcement esetén a szilárdságcsökkenés 25% CaO-veszteség után már igen gyors. A beton a CaO-mennyiség ⅓-ának elvesztése után gyakorlatilag tönkrementnek tekinthető *(Biczók 1956, 1960)*.

Biczóknál (1956, 1960) olvasható, hogy *Tillmanns* szerint a víz karbonát-keménysége és szabad szénsav-tartalma között összefüggés áll fenn. A lágy víz kis CO_2-tartalom esetén is agresszív lehet, a kemény víz csak nagy CO_2-tartalom mellett agresszív. A *Tillmanns*-féle görbén a 17 ºC hőmérsékletű víz szabad szénsav-tartalmából és karbonát-keménységéből a beton korrózió-veszélyének mértéke az építési gyakorlat számára elegendő pontossággal leolvasható (*11. ábra*). A *Tillmanns*-féle görbét már az MSZ 15300 R:1953 szabványajánlásban is szerepeltették, amelyben azt írták, hogy a talajvíz agresszív szénsav (CO_2) tartalmának meghatározása is ajánlatos, ha a helyszíni körülmények olyanok, hogy agresszív szénsav jelenlétére is számítani lehet.

7. táblázat: Példa a vizek szabad széndioxid-tartalmára a pH-érték és a változó keménység (karbonát-keménység) függvényében mg/dm³ mértékegységben (https://www.greenaqua.hu/hu/co2-beoldas)

°nk	pH-érték																				
	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8,0
1	30	24	19	16	12	10	8	6	5	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1
2	60	48	38	31	24	19	16	12	10	8	6	5	4	4	3	2	2	2	1	1	1
3	90	72	57	46	36	29	23	18	15	12	9	8	6	5	4	3	3	2	2	2	1
4	120	96	76	61	48	38	31	24	20	16	12	10	8	7	5	4	4	3	2	2	2
5	150	120	95	76	60	48	38	30	24	19	15	12	10	8	6	5	4	3	3	2	2
6	180	143	114	91	72	57	46	36	29	23	18	15	12	10	8	6	5	4	3	3	2
7	210	167	133	106	84	67	53	42	34	27	21	17	14	11	9	7	6	5	4	3	3
8	240	191	152	121	96	76	61	48	39	31	24	20	16	13	10	8	7	5	4	4	3
9	270	215	171	136	108	86	68	54	43	34	27	22	18	14	11	9	7	6	5	4	3
10	300	239	190	151	120	95	76	60	48	38	30	24	19	16	12	10	8	6	5	4	4
11	330	263	209	166	132	105	83	66	53	42	33	27	21	17	14	11	9	7	6	5	4
12	360	286	228	181	144	114	91	72	58	46	36	29	23	19	15	12	10	8	6	5	4
13	390	310	247	196	156	124	98	78	62	50	39	31	25	20	16	13	10	8	7	5	4
14	420	334	266	211	168	133	106	84	67	53	42	34	27	22	17	14	11	9	7	6	5
15	450	358	284	226	180	143	114	90	72	57	45	36	29	23	18	15	12	9	8	6	5
16	480	382	303	241	192	152	121	96	77	61	48	39	31	25	20	16	13	10	8	7	5
17	510	406	322	256	204	162	129	102	81	65	51	41	33	26	21	17	13	11	9	7	6
18	540	429	341	271	215	171	136	108	86	68	54	43	35	28	22	18	14	11	9	7	6
19	570	453	360	286	227	181	144	114	91	72	57	46	36	29	23	19	15	12	10	8	6
20	600	477	379	301	239	190	151	120	96	76	60	48	38	31	24	19	16	12	10	8	7



10. ábra: A beton szilárdságcsökkenése portlandcement kilúgozása esetén (Biczók 1956, 1960)

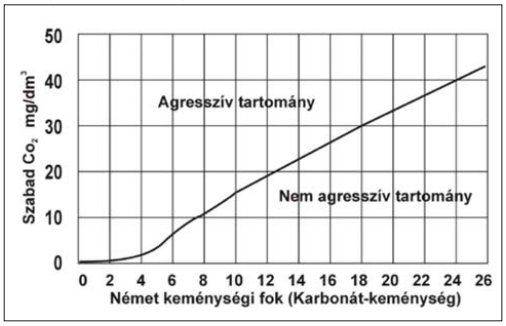
Krenkler (1980) szerint a cementkő főbb összetevői közül a széndioxid (CO_2) vizes oldatában a

- kalcium-hidroxid, szabad ($Ca(OH)_2$) erősen oldódik,
- trikalcium-szilikát-hidrát ($3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}xH_2O$) közepesen oldódik,
- tetrakalcium-aluminát-hidrát ($4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}xH_2O$) kissé oldódik,
- tetrakalcium-aluminát-ferrit-hidrát ($4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3{\cdot}xH_2O$) kissé oldódik.

A víz kalcium-kioldó képességét (LDC, lime dissolving capacity) és agresszív széndioxid-tartalmát, más szóval agresszív széndioxid-kapacitását ($CO_{2,agresszív}$) az MSZ EN 13577:2007, MSZ 448-23:1983 és például a DIN 4030-2:2008 szabvány szerint lehet meghatározni. Mind a három szabványban leírt referencia módszer, azaz pontos titrálásos kalcium-kioldó képesség (mész-kioldó képesség) vizsgálati módszer a DIN 4030-2:2008 szabvány szerinti *Heyer*-féle „márvány-kísérlet"-en alapszik (*Heyer*, 1888). A következő bekezdésekben ezt a három vizsgálati módszert ismertetjük részletesen.

A vízminta agresszív széndioxid-tartalma az MSZ EN 13577:2007 szabvány szerint két titrálási eredmény különbségével arányos. A mintavétel során ügyelni kell arra, hogy a széndioxid a vízmintából ne illanjon el. A vizsgálatot 0,5 literes lezárható üvegben kell végezni, amelybe 10 g kalcium-karbonát port kell bemérni, majd a vízmintával színültig fel kell tölteni, és gondosan le kell zárni. Az így előkészített vizsgálati minta hőmérséklete a mintavétel után a laboratóriumba szállításig

11. ábra: Tillmanns-féle görbe a beton szénsavkorróziójának számításához (Biczók 1956, 1960)



ne változzon többel, mint 5 ºC. A vizsgálatot a mintavételtől számított 48 órán belül el kell végezni. A vizsgálat előtt 0,2 ºC pontossággal le kell mérni a vízminta hőmérsékletét, és ügyelni kell arra, hogy a vizsgálat alatt a víz hőmérséklete ettől az értéktől 2 ºC-nál nagyobb mértékben ne térjen el. A kalcium-karbonát port és a vízmintát tartalmazó üveget a hőmérséklet-változástól védve mágneses berendezéssel legalább két órán át erőteljesen rázni kell. A kalcium-karbonát por leülepedése után 100 ml letisztult oldatot 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú sósavval 4,3 pH-értékig titrálni kell, és meg kell határozni a titráláshoz elhasznált sósav térfogatát ml-ben (H_2). A titrálást az eredeti vízmintán is el kell végezni, amelyhez az elhasznált sósav térfogata H_1 ml.

Az MSZ EN 13577:2007 szabvány szerint a víz kalcium-kioldó képességét az

$$LDC_{CaO,mol} = \frac{1}{2} \times 56 \times (H_2 - H_1) = 28 \times (H_2 - H_1)$$

egyenlet adja CaO mol/dm^3 mértékegységben, **annak feltételezésével**, hogy a titráláskor a sósav mérőoldat által felhasznált széndioxid-tartalomnak a fele a kalcium-karbonát porból származik, és csak a másik fele képezi a vízminta kalcium-kioldó képességgel rendelkező agresszív széndioxid-tartalmát.

Az összefüggésben 56 g/mol a kalcium-oxid (CaO) molekulatömege. A víz agresszív széndioxid-tartalmát ([$CO_{2,agresszív,mol}$]) szintén mol/dm^3 mértékegységben az LDC-értéket 44/56-dal szorozva kapjuk meg, ahol 44 g/mol a széndioxid (CO_2) és 56 g/mol a kalcium-oxid (CaO) molekulatömege:

$$[CO_{2,agresszív,mol}] = \frac{44}{56} \times LDC = \frac{44}{56} \times \frac{1}{2} \times 56 \times (H_2 - H_1) = 22 \times (H_2 - H_1)$$

Az MSZ 448-23:1983 szabvánnyal a víz szabad széndioxid-, kötött széndioxid-, egyensúlyi (tartozékos) széndioxid- és agresszív széndioxid-tartalmát egyaránt meg lehet határozni. Az agresszív széndioxid mennyisége meghatározásának elve – az MSZ 448-23:1983 vizsgálati szabvány szerint –, hogy a mészre agresszív széndioxidot (szénsavat) tartalmazó vízben a feleslegben hozzáadott kalcium-karbonát egy része meghatározott körülmények között kalcium-hidrogén-karbonát formájában feloldódik, és ezáltal a vizsgálandó víz kötött széndioxid-koncentrációja az eredetihez képest megnő. Ez a koncentráció-növekedés adja a vizsgált víz mészre agresszív széndioxid-koncentrációjának számszerű értékét.

Az agresszív széndioxid-tartalom MSZ 448-23:1983 szabvány szerinti meghatározása során a zárható palackban előkészített vízmintához néhány gramm kalcium-karbonát port kell adni, ezután két órán át mágneses-keverővel keverni kell, majd le kell szűrni. A szüredék tiszta, átlátszó, 100 cm^3 térfogatú részét 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú sósav mérőoldattal titrálni kell, eredménye ml-ben kifejezve m_1. A titrálás végpontját a pH = 4,3 érték elérése jelzi. A mérést ugyan ilyen módon kalcium-karbonát hozzáadása nélkül is el kell végezni, eredménye ml-ben kifejezve m_2. A vizsgált vízminta mészre agresszív széndioxid-koncentrációját ([$CO_{2,agresszív,mol}$]) a kétféle minta sósav igénye különbségének 22-szerese adja mol/dm^3 mértékegységben, annak feltételezésével, hogy a titráláskor a sósav mérőoldat által felhasznált széndioxid-tartalomnak a fele a kalcium-karbonát porból származik, és csak a másik fele képezi a vízminta agresszív széndioxid-tartalmát:

$$[CO_{2,agresszív,mol}] = \frac{1}{2} \times 44 \times f \times (m_1 - m_2) = 22 \times f \times (m_1 - m_2)$$

Az összefüggésben a 44 g/mol a széndioxid (CO_2) molekulatömege, és *f* a 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú sósav mérőoldat faktora. Ha a sósav-oldat pontos koncentrációjú, akkor faktora *f* = 1,0.

Közbevetőleg megjegyzendő, hogy pontos koncentrációjúnak akkor nevezik a mérőoldatot, ha annak koncentrációját a titrálás elvégzése előtt határozzák meg. Ezt faktorozásnak hívják. A faktorozásra azért van szükség, mert a reagensek bemérésével elkészített mérőoldatok koncentrációja általában nem pontos, és időben is változik (*Neumüller*, 1982).

Ugyanakkor a kalciumra agresszív széndioxid-tartalomnak mol/dm^3 mértékegységben kiszámított kalcium-karbonát kioldóképessége ($LDC_{CaCO_3,mol}$) azt adja meg, hogy 1,0 dm^3 agresszív széndioxid-tartalmú víz hány gramm kalcium-karbonátot képes feloldani, **ahol 100,1 g/mol a kalcium-karbonát** ($CaCO_3$) molekulatömege és 44 g/mol a széndioxid (CO_2) molekulatömege:

$$LDC_{CaCO_{3,mol}} = \frac{100,1}{44} \times [CO_{2,agresszív}] = \frac{100,1}{44} \times 22 \times f \times (m_1 - m_2) =$$

$$= 50,05 \times f \times (m_1 - m_2)$$

Az MSZ 448-23:1983 szabványban leírt titrálásos mészkioldóképesség vizsgálati módszer azonos a DIN 4030-2:2008 szabvány szerinti *Heyer*-féle „márvány-kísérlettel" (*Heyer* 1888).

A DIN 4030-1:2008 szabvány szerint a literenként 30 mg-nál kevesebb kalcium-oxidot tartalmazó, azaz kalcium- és/vagy magnézium-sókat nem vagy alig tartalmazó lágy vizek a cementkő kalcium-hidroxidját kioldani képesek, de a legfeljebb 0,6 víz-cement tényezőjű vízzáró betont gyakorlatilag nem támadják meg, ha mentesek az ártalmas mennyiségű agresszív szénsavtól vagy más betont károsító anyagtól.

A DIN 4030-1:2008 szabványban felhívják a figyelmet arra, hogy az agresszív széndioxid hasonlóképpen oldja a kalcium-hidroxidot mint a többi gyenge sav. Minthogy az agresszív széndioxid az összes szabad széndioxid-tartalomnak csak egy bizonyos hányada, meghatározását a DIN 4030-2:2008 szabvány alapján, gondosan kell végezni.

A DIN 4030-2:2008 szabvány szerinti, pontos eredményt adó referencia-módszerrel a víz karbonát-kioldó képességét szintén a *Heyer*-féle „márvány-kísérlettel" kell meghatározni (*Heyer*, 1888). Ehhez a zárható palackban előkészített 500 cm^3 térfogatú vízmintához néhány gramm kalcium-karbonát port kell adni, ezután hőmérsékletváltozás nélkül két órán át rázni vagy keverni kell, majd le kell szűrni. A szüredék tiszta, átlátszó, 100 cm^3 térfogatú részét 0,1 mol/dm^3 koncentrációjú sósav mérőoldattal pH = 4,3 érték eléréséig elektrometrikusan titrálni kell. A vizsgált vízminta karbonát-kioldóképességét a kalcium-karbonát poros titrálás és a hidrogén-karbonát keménység vizsgálat sósav igénye különbségének 14-szerese adja CaO mg/dm^3 mértékegységben.

Ha a CaO mg/dm^3 mértékegységben kapott referencia vizsgálati karbonát-kioldóképességet 17,8**571-del megszorozzuk**, akkor a karbonát-kioldóképességet CaO mmol/m^3 mértékegységben kapjuk meg, ugyanis 1,0 mg/dm^3 CaO = 1/56 mmol/dm^3 CaO = 1000/56 mmol/m^3 CaO = 17,857143 mmol/m^3, ahol 56 mg/mmol a CaO molekulatömege. Ha a német szabvány szerint CaO mg/dm^3 mértékegységben kapott referencia vizsgálati karbonát-kioldóképességet 1,5696-del szorozzuk meg, akkor a karbonát-kioldóképességet CO_2 mg/dm^3 mértékegységben adódik.

A DIN 4030-2:2008 szabvány szerint a víz karbonát-kioldóképességét gyors vizsgálattal két lépésben lehet meghatározni. Először 5 ml térfogatú eredeti vízmintához

3 csepp „kalcium-indikátor-oldatot" kell adni, majd ehhez annyi sósavat kell csepegtetni, hogy az oldat színe a kékről a szürkén át pirosba csapjon. Az eredeti vízminta karbonát-keménysége (hidrogén-karbonát-keménysége) a színátcsapáshoz szükséges sósav-cseppek számából (A) adódik CaO mol/dm^3 mértékegységben. Ezután az eredeti vízmintához kalcium-karbonát port adva szűrletet kell készíteni, és a szűrlet 5 ml térfogatú mennyiségéhez 3 csepp „kalcium-indikátor-oldatot" kell adni, és ehhez a keverékhez annyi sósavat kell csepegtetni (B), hogy a keverék színe a kékről a szürkén át pirosba csapjon. A karbonát-kioldóképesség CaO mg/dm^3 mértékegységben a következő összefüggéssel határozható meg:

$$LDC_{(CaO,mg)} = f_1 \cdot (A - f_2 \cdot B)$$

ahol f_1 és f_2 az alkalmazott sósav-oldatok faktora. Ha a sósav-oldat pontos koncentrációjú, akkor faktora f = 1,0. A CaO mg/dm^3 mértékegységben kapott **karbonát-kioldóképesség** gyors vizsgálati eredményt 1,5696-del szorozva az eredményt CO_2 mg/dm^3 mértékegységben kapjuk meg.

6. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A kémiailag agresszív hatóanyagok a beton duzzadásos vagy oldódásos korrózióját, esetleg egyidejűleg mind a kettőt okozhatják. A beton duzzadásos és oldódásos korróziójának megkülönböztetése azért fontos, mert **mértékük eltérő jellegük** folytán több vonatkozásban is eltérő betontechnológiai módszerekkel csökkenthető. Míg a duzzadásos betonkorrózió első jelei a természetes vizekkel érintkező műtárgyakon az 1890-es években mutatkoztak, és az ellene való védekezésnek a szulfátálló cementek alkalmazásával mintegy nyolcvan éves hagyománya van, addig az oldódásos betonkorrózió megjelenése az ipari és kommunális technológiák lassúbb elterjedése következtében későbbre tehető, és az ellene való védekezés is újabb keletű, nehezebb és módszerei kevésbé kiforrottak. Az oldódásos betonkorrózió igen sokrétű jelenség.

Cikksorozatunk jelen **részében a vizek és folyadékok kém**hatásával, keménységével, agresszív széndioxid-tartalmával foglalkozó szakirodalmat tekintettük át, a következőkben a szervetlen és szerves savak, egyes sóoldatok, zsírok és olajok okozta betonkorrózióval, valamint az oldódásos korrózió elleni védekezés betontechnológiai módszereivel foglalkozó szakirodalmi olvasmányainkról szándékozunk beszámolni.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

8. ACKNOWLEDGMENT

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

9. HIVATKOZÁSOK

Bán M. (1986), „Hévizeinkből származó vízkövek ásvány-kőzettani sajátosságai", NME Miskolc Közleményei. I. Sorozat. *Bányászat*. 33. kötet. 1986. 1-4. füzet, pp. 25-32.

Bán M. (1995), „Hévizek karbonátos vízkőkiválásainak termikus vizsgálata", Miskolci Egyetem Közleményei. A Sorozat. *Bányászat*. 50. kötet. 1995. pp. 213-219.

Biczók I. (1956), "Betonkorrózió, betonvédelem", *Műszaki Könyvkiadó*, Budapest

Biczók I. (1960), „Betonkorrosion, Betonschutz", *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Bosseler, B. – Puhl, R. (2005), „Beschichtigungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten", *IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur*, Gelsenkirchen

Heyer, C. (1888), „Ursache und Beseitigung des Bleiangriffs durch Leitungswasser, chemische Untersuchungen aus Anlass der Dessauer Bleivergiftungen im Jahre 1886", *Verlagsbuchhandlung Paul Baumann*, Dessau

Hölting, B. - Coldewey, W. G. (2013), „Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie", 8. Auflage. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg

Hunkár B. (1940), „A természetes vizek, felhasználásuk és tisztításuk". Fejezet: A természet világa. V. A kémia és vívmányai" című könyv első részében. (Szerkesztette: Dr. Erdey-Grúz Tibor és dr. Gróh Gyula) pp. 222-247. *Királyi Magyar Természettudományi Társulat,* Budapest

Huggenberger, U. (2010), „Ausmass der Betonerosion in Schweizer ARA", *Betonsuisse Marketing AG. Bern*

Klopfer, H. (1978), „Die Carbonatisation von Sichtbeton und ihre Bekämpfung", Bautenschutz und Bausanierung. 1978., Heft 3., pp. 86-97.

Krenkler, K. (1980), „Chemie des Bauwesens", Band 1. Anorganische Chemie. *Springer-Verlag* Berlin/Heidelberg GmbH

Kopecskó, K. (2006), „A gőzölés hatása a cementklinkerek és cementek kloridion megkötő képességére", PhD disszertáció, pp. 23-25.

Materialprüfungsanstalt (MPA) (2007), „Anforderungen an Hochleistungsbetone für Abwasserrohre bei starkem chemischen Angriff", Berlin-Brandenburg

Miskolci Egyetem (2009), „Néhány információ a mezőkövesdi Zsóry-fürdő vizéről", Miskolci Egyetem Közleményei. A Sorozat. *Bányászat*. 77. kötet. 2009. pp. 229-230.

Neumüller, O-A. (1982), „Römpp vegyészeti lexikon", Második kötet. *Műszaki Könyvkiadó,* Budapest

Neumüller, O-A. (1983), „Römpp vegyészeti lexikon", Harmadik kötet. *Műszaki Könyvkiadó,* Budapest

Öllős G. – Oláh J. – Palkó Gy. (2010), „Rothasztás", *Magyar Víziközmű Szövetség*, Budapest

Riesz L. (1989), „Cement- és mészgyártási kézikönyv", Építésügyi Tájékoztatási Központ*,* Budapest

Stein, D. – Brauer, A. (2005), „Widerstand von Beton- und Stahlbetonrohren für kommunale Entwässerungssysteme gegen chemische Angriffe", Bochum

Tillmanns, J. – Heublein, O. (1912): „Über die kohlensauren Kalk angreifende Kohlensäure der natürlichen Wässern", *Ges. Ing*., Jg. 34., 1912., pp. 669–677.

Wisotzky, F. (2011), „Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung. Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen", *Springer-Verlag*, Berlin/Heidelberg

Zühlke, K.: „Vorlesung Trinkwasseraufbereitung", http://www.trinkwasserspezi.de/kksggwhtm, 2016

http://www.chemie.de/lexikon/Säurekonstante.html, évszám nélkül. Letöltés: 2017. június 15.

https://www.greenaqua.hu/hu/co2-beoldas, évszám nélkül. Letöltés: 2017. május 20.

10. HIVATKOZOTT RENDELETEK, SZABVÁNYOK, IRÁNYELVEK

28/2004. (XII. 25.) „KvVM rendelet a vízszennyező anyagok kibocsátásaira vonatkozó határértékekről és alkalmazásuk egyes szabályairól"

ASTM D 1126:2012 „Standard Test Method for Hardness in Water"

DIN 1310:1984 „Zusammensetzung von Mischphasen (Gasgemische, Lösungen, Mischkristalle); Begriffe, Formelzeichen"

DIN 4030-1:2008 „Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte"

DIN 4030-2:2008 „Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Teil 2: Entnahme und Analyse von Wasser- und Bodenproben"

DIN 38405-26:1989 „Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Anionen (Gruppe D); Photometrische Bestimmung des gelösten Sulfids (D 26)"

DIN EN ISO 80000-9:2017 „Größen und Einheiten. Teil 9: Physikalische Chemie und Molekularphysik (ISO/DIS 80000-9:2017); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 80000-9:2017"

ISO 4316:1977 „Surface active agents. Determination of pH of aqueous solutions. Potentiometric method"

MSZ 260-4:1971 „Szennyvizek vizsgálata. Hidrogén-ion koncentráció (pH-érték) meghatározása"

MSZ 448-11:1986 „Ivóvízvizsgálat. Lúgosság meghatározása titrálással, a hidrogén-karbonátion, a karbonátion- és a hidroxilion-tartalom kiszámítása"

MSZ 448-21:1986 „Ivóvízvizsgálat. Az összes, a karbonát- és a nemkarbonát-keménység meghatározása"

MSZ 448-23:1983 „Ivóvízvizsgálat. A szabad, a kötött, az egyensúlyi és a mészre agresszív szén-dioxid meghatározása"

MSZ 1484-22:2009 „Vízminőség. 22. rész: A pH és az egyensúlyi pH meghatározása”
MSZ 4798:2016 „Beton. 1. rész: Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelőség, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon”
MSZ 15300 R:1953 „Csatornatervezés és méretezés. Közcsatornák”
MSZ EN 1504-9:2009 „Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Fogalommeghatározások, követelmények, minőségellenőrzés és megfelelőségértékelés. 9. rész: Termékek és rendszerek alkalmazásának általános elvei”
MSZ EN 12176:2000 „Iszapjellemzők. A pH-érték meghatározása”
MSZ EN 13577:2007 „Vegyi hatásnak kitett beton. A víz agresszív szén-dioxid-tartalmának meghatározása”
MSZ EN 14630:2007 „Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. A megszilárdult beton karbonátosodási mélységének meghatározása fenolftaleines módszerrel”
MSZ EN 15933:2013 „Iszap, kezelt biohulladék és talaj. A pH meghatározása”
MSZ EN ISO 9963-1:1998 „Vízminőség. A lúgosság meghatározása. 1. rész: Az összes és az összetett lúgosság meghatározása (ISO 9963-1:1994)”
MSZ EN ISO 9963-2:1998 „Vízminőség. A lúgosság meghatározása. 2. rész: A karbonátlúgosság meghatározása (ISO 9963-2:1994)”
MSZ EN ISO 10523:2012 „Vízminőség. A pH meghatározása (ISO 10523:2008)”
Cemsuisse-Merkblatt MB 01:2010 „Betonerosion in Biologiebecken von Abwasserreinungsanlagen”, Verband der Schweizerischen Cementindustrie. Bern
Zementmerkblätter T3 „Sulfide in Abwasseranlagen. Ursachen, Auswirkungen, Gegenmaßnahmen” Zement-Merkblatt, Tiefbau, Beratung Zement. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V., Köln, 2009.

Dr. Balázs L. György (1958) okl. építőmérnök, mérnöki matematikai szakmérnök PhD, Dr. habil., egyetemi tanár, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék vezetője. MTA műszaki tud. kandidátusa. Fő kutatási területei: beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), roncsolásmentes vizsgálatok. Speciális betonok és betétek: szálerősítésű betonok (FRC), nem acélanyagú (FRP) betétek, megerősítések anyagai és módjai, HPC, UHPC, LWC. Tűzállóságra való tervezés, tűzállóság fokozása. Fagyállóság fokozása. Kémiai ellenállóképesség fokozása. Tartósság. Használati élettartam. Fenntartható építés. Erőátadódás betonban, vasbeton tartók repedezettségi állapota. Fáradás. Lökésszerű terhelés. Nukleáris létesítmények. A ***fib*** (Nemzetközi Betonszövetség) elnöke (2011-2012), jelenleg tiszteletbeli elnöke. A ***fib*** Magyar Tagozat elnöke. Az Int. PhD Symp. in Civil Engineering alapítója. A ***fib*** Com 9 „Dissemination of knowledge” elnöke.

Dr. Kausay Tibor (1934) okl. építőmérnök (1961), vasbetonépítési szakmérnök (1967), egyetemi doktor (1969), a műszaki tudomány kandidátusa (1978), Ph.D. (1997), címzetes egyetemi docens (1985), címzetes egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszéken (2003), a ***fib*** Magyar Tagozat tagja (2000), az MTA gróf Lónyay Menyhért emlékérmese (2003), a Palotás László-díj birtokosa (2015). Tevékenysége a betontechnológiai és a kő- és kavicsipari kutatásra, fejlesztésre, szakértésre, oktatásra, szabványosításra terjed ki. Publikációinak száma mintegy 220.

Dr. Kopecskó Katalin (1961) okl. vegyészmérnök (BME, Vegyészmérnöki Kar, 1990), okl. betontechnológus szakmérnök (2004), PhD (2006), az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék oktatója 1999 és 2014 között, egyetemi docens a BME Geotechnika és Mérnölgeológia Tanszékén. Fő érdeklődési területei: építőanyagok tartóssága, cementek és cement kiegészítő anyagok hidratációja, anyagvizsgálat röntgendiffrakcióval és termoanalitikával. A ***fib*** Magyar Tagozat, az SZTE, valamint az MSZT/MB 102 „Cement és mész” Nemzeti szabványosító műszaki bizottság tagja.

Dr. Nemes Rita (1978) okl. építőmérnök, betontechnológiai szakmérnök, PhD, egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési területei: roncsolásmentes betonvizsgálatok, hulladék alapú adalékanyagok és kiegészítő anyagok alkalmazása betonban, betonacél tapadás speciális betonokban, könnyűbetonok, tartósság. A ***fib*** Magyar Tagozatának és a Szilikátipari Tudományos Egyesületnek tagja.

Dr. Nehme Salem Georges (1963) okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a beton porozitása, a betonok és öntömörödő betonok tartósságának összefüggése a porozitással, az öntömörödő betonok és acélszálas öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében, az öntömörödő betonok tömegbetonként történő alkalmazási problémainak megszüntetése. A Magyar Mérnöki Kamara (T1-01-9159), a ***fib*** Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

Dr. Lublóy Éva (1976) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2001), okl. betontechnológus szakmérnök (2011), okl. tűzvédelmi szakmérnök (2011), egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén (2008). Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A ***fib*** Magyar Tagozat tagja.

Dr. Józsa Zsuzsanna (1950) PhD, címzetes egyetemi tanár a BME-n, építészmérnök, épületrekonstrukciós szakmérnök. Főbb kutatási területei: könnyűbeton, építőanyagok tönkremenetele és védelme, szerkezetek hő- és nedvességtechnikai jellemzői, környezetkímélő építés anyagai.

Dr. Arany Piroska (1946) okl. szerkezetépítő mérnök, címzetes egyetemi docens. A BME Építőanyagok, majd az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék oktatója 1970 és 2009 között. Oktatási tevékenységét a nappali, a levelező tagozaton, szakmérnöki és egyéb tanfolyamok keretében végzi jelenleg is. Kutatási, ipari megbízásos és szakértői tevékenységet elsősorban betontechnológia, kötőanyagok, szakipari munkák anyagai, minőség-ellenőrzés témakörben végez. Az MMK szakértője, tagja több szakmai bizottságnak, a ***fib*** Magyar Tagozatának, az SZTE-nek.

DISSOLUTION OF CONCRETE BY ACIDS – Literature review
Part 1: Chemical effects of water and liquides, hardness of water, aggressive CO_2 content
György L. Balázs – Tibor Kausay – Katalin Kopoecskó – Rita Nemes – Salem G. Nehme – Éva Lublóy – Zsuzsanna Józsa – Piroska Arany
Concrete, reinforced concrete or prestressed concrete elements can be subjected to chemical corrosion in additon to physical and mechanical effects. All of the constituents of concrete: mineral components (aggregates or inert supplementary materials) as well as the binder (cement and supplementary cementitious materials) can be sensitive. Whenever the hardened cement stone is considered, we can distinguish leaching corrosion, volumetric increase or corrosion by salts. Dissolution of concrete can be induced by soft water, water or solutions containing aggressive CO_2, organic and mineral acids. All these may reduce the serviceability and the ultimate capacity of concrete, reinforced concrete and prestressed concrete elements, therefore, development of concretes with improved resistance against acids is required.

***fib* Symposium 2017 Paper ID435**

HARMONIZATION OF STRUCTURAL PERFORMANCE AND MATERIAL PROPERTIES FOR HIGH TEMPERATURES IN CONCRETE

György L. Balázs[1], Katalin Kopecskó[2], Naser Alimrani[3], Nabil Abdelmelek[4] and Éva Lublóy[5]

[1] Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest, Hungary, email: balazs@vbt.bme.hu
[2] Budapest University of Technology and Economics, Department of Engineering Geology and Geotechnics, H-1521 Budapest, Hungary; email: kopecsko.katalin@epito.bme.hu
[3] Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest, Hungary, email: Naser-omrani@hotmail.com
[4] Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest, Hungary, email: nabil3c@gmail.com
[5] Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest, Hungary, email: lubloy.eva@epito.bme.hu

ABSTRACT

An extensive experimental study has been carried out to analyse the post-heating characteristics of concrete subjected to high temperatures up to 800 °C. Major parameters of our study were the type of supplementary materials of cement (slag, fly ash, trass, silica fume, metakaolin) and the level of maximum temperature (50, 150, 300, 500 or 800 °C). Present study includes analyses of surface cracking and residual compressive strength.
Our observations indicated that the most intensive surface cracking was observed by using Portland cement without addition of supplementary materials. The increasing contents of the supplementary material of cement influence differently the relative post-heating compressive strength. Tendencies of surface cracking and reduction of compressive strength were in agreement, i.e. the more surface cracks, the more strength reduction has been observed.

Keynotes: fire, fire resistance, concrete, supplementary materials, thermoanalysis

INTRODUCTION

Different concrete types may also mean different possibilities for fire design. Characteristics of concrete during and after the heating process depend on the type of cement, the type of aggregate and the interaction between them *(Eurocode, 1991)*. Environmental protection requires the use of cements with low clinker content. Present study is focusing to the influence of high temperatures on specimens made of

cements with different supplementary materials. Characteristics of concrete during and after the heating process depend on the type of cement, the type of aggregate and the interaction between them *(Khoury 1995; Budelman 1987)*.

Behaviour at high temperatures depends on parameters like water/cement ratio, amount of CSH (calcium-silicate-hydrates), amount of $Ca(OH)_2$ and degree of hydration. Different cement pastes can perform differently in fire *(Grainger, 1980)*.

Supplementary materials are used extensively. Supplementary materials having pozzolanic behaviour typically improve the durability of concrete and can also reduce the rate of heat liberated due to hydration, which is beneficial for mass concrete applications. In fire, the heated surface region of concrete loses its moisture content by evaporation from the surface and by migration into the inner concrete mass driven by the temperature gradient *(Schneider, Weiss, 1997; Bazant, Kaplan 1996)*.

Due to high temperature the structure and the mineral composition of concrete changes. Around 100 °C the mass-loss is caused by water evaporating from the micropores. The decomposition of ettringite ($3CaOAl_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) takes place between 50 °C and 110 °C. At 200 °C there is a further dehydration, which causes small mass loss. The mass loss of the test specimens with various moisture contents was different till all the pore water and chemically bound water were gone. Further mass loss was not perceptible around 250-300 °C. The analysis was made by thermogravimetry (TG) *(Hinrichsmeyer, 1987; Eurocode, 1992)*. During heating the endothermic dehydration of $Ca(OH)_2$ takes place between temperatures of 450 °C and 550 °C. This endothermic reaction is accompanied by loss of mass *(Thielen, 1994)*. Dehydration of calcium-silicate-hydrates was found at the temperature of 700 °C *(Gambarova, 2004)*.

In the case of concretes made with quartz gravel aggregate, other influencing factor is the change in crystal structure of quartz α formation into → β formation at 573 °C. This transformation followed by 5.7 % volumetric increase that influences the strength detrimentally *(Hoj, 2005)*.

Based on this information, we carried out an extensive experimental study to analyze the post-heating characteristics of concretes subjected to temperatures up to 800 °C. The major parameters in our study were (i) the type of supplementary material (slag, fly ash, trass, silica fume or metakaolin) either as a substitution of cement clinker or addition to the ordinary Portland cement and (ii) the level of maximum temperature (50, 150, 300, 400, 500 or 800 °C).

EXPERIMENTAL PROGRAMME

Materials

Cements involved in this study were: Portland cement (CEM I 42,5 R); Portland-fly ash cement (CEM II/A-V 42,5 R); Portland-pozzolana cement (CEM II/A-P 42,5 N) and Portland cement (CEM I 42,5 N) mixed with silica fume or metakaolin (12 m%

related to the mass of the cement). Our concrete mix design followed the Palotás-Bolomey method (*Pekár, 2013*). The mix proportions are given in Table 1. The concrete specimens were prepared using quartz gravel and sand as aggregate. Specimens were removed from the formwork after 24 hours then stored in water for 7 days and kept at laboratory conditions (temperature 20 °C, 65% relative humidity) until testing in accordance with the standard. The residual compressive strength was tested on concrete cubes of 150 mm sides.

Cement paste specimens (cubes with dimensions of 30 mm sides) were also prepared to study the mineralogical composition and changes of the binding material by thermoanalytical methods.

Table 1. Experimentally studied concrete mixes.

Mixtures *Type of cement*	*M1* *CEM I 42,5 R*	*M2* *CEM II/A-V 42,5 R*	*M3* *CEM II/A-P 42,5 N*	*M4* *CEM II/A-S 42,5 N*	*M5* *CEM I 42,5 N*	*M6* *CEM I 42,5 N*
supplementary material	-	fly ash*	trass*	slag*	microsilica 12 m%**	metakaolin 12 m%**
cement kg/m^3	350	350	350	530	400	400
water kg/m^3	151	151	151	151	140	140
aggregates						
sand, 0-4 mm kg/m^3	912	912	912	912	748	736
gravel, 4-8 mm kg/m^3	485	485	485	485	468	400
gravel, 8-16 mm kg/m^3	544	544	544	544	655	644
superplasticizer kg/m^3	1.4	1.4	1.4	1.1	7,2	8

*amount of the main constituents according to the standard EN 197-1:2000 (6-20 m%)
**related to the mass of cement

Test methods

Our experimentally applied heating curve was similar to the standard fire curve, up to 800 °C. Specimens were kept for two hours at the various maximum temperature level. Specimens were then slowly cooled down in laboratory conditions for further observations. The thermal load was applied at the age of 28 days. The specimens were 30 days old by testing the compressive strength after cooling down with an ALPHA 3-3000S test machine.

Changes in phases were followed by thermoanalysis (TG/DTG/DTA) using Derivatograph-Q 1500 D. This equipment is able to collect TG/DTG/DTA data from the same measurement simultaneously. For computational evaluation of the thermoanalytical test results Winder (Version 4.4.) software was used. There is a simultaneous procedure where the TG (Thermogravimetry) and DTA (Differential Thermal Analysis) thermoanalytical methods can be combined. As the result of thermogravimetry (TG) the first derivative of thermogravimetric curve (DTG) is also obtained. Reference material was alumina (Al_2O_3), and 10 ºC min^{-1} heating rate was

chosen up to ~1000 ºC. Tests were carried out in air atmosphere. Part of the specimens was ground in an agate mortar making powder form sample. Mass of the sample was about 300 mg. The test results were evaluated by using Winder V 4.4 software.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Visual observations

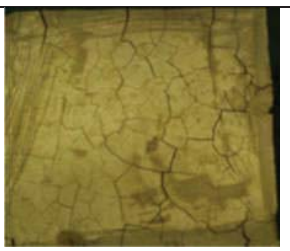
Surface damages and cracks on the specimens were analysed after the thermal load, since the extent of the surface cracks on the specimens is a preliminary indicator. During heating, a substantial amount of water was visually observed to escape from the specimens.

The following conclusions are drawn by the observation of the specimens:

- Specimens prepared by ordinary Portland cement (CEM I 42,5 R, mixture M1): even at the thermal load of 500 °C, corners of the specimens spalled off (see Figure 1).
- Specimens prepared by Portland-pozzolana cement (CEM II/A-P 42,5 N, mixture M2), by Portland-fly ash cement (CEM II/A-V 42,5 R, mixture M3) and by Portland-slag cement (CEM II/A-S 42,5 N, mixture M4): due to the thermal load of 800 °C, surface cracks formed on concrete specimens, however the corners of the specimens did not spall (see Figure 1). It indicates that lower internal tensions developed as a result of thermal load.
- In case of concrete specimens with addition of silica fume (mixture M5) or metakaolin (mixture M6) the specimens did not spall and the amount of surface cracks reduced (see Figure 1).



CEM I 42,5 R (M1)



CEM II/A-P 42,5 N (M2)
CEM II/A-V 42,5 R (M3)
CEM II/A-S 42,5 N (M4)



CEM I 42,5 N + microsilica (M5)
CEM I 42,5 N + metakaolin (M6)

Figure 1. Typical surface crack developments due to temperature loading

Compressive strength

Relative residual compressive strength values of concrete specimen are presented in Figure 2 as a function of the concrete composition and the maximum temperature of thermal load, from which the following conclusions can be drawn:

- The relative residual compressive strength decreased due to thermal load of 150 °C, then slightly increased due to thermal load of 300 °C. In the case of

higher temperatures than 300 °C the residual compressive strength decreases again.

- As a result of thermal load, the relative residual compressive strength values of concrete prepared with trass, fly ash and slag containing Portland-composite cements (CEM II/A-P 42,5 N; CEM II/A-V 42,5 R, CEM II/A-S 42,5 N) are higher or at least equal to those of concrete specimens prepared from CEM I 42,5 R (Portland cement).
- In case of concrete prepared with silica fume or metakaolin containing binder (M5 and M6) the strength decreased due to the temperature load of 800 °C. Addition of silica fume or metakaolin was found unfavourable for fire resistance of concrete at early ages (thermal load was applied at the age of 28 days). This could be explained by the different rate of pozzolanic reaction of the SCMs.

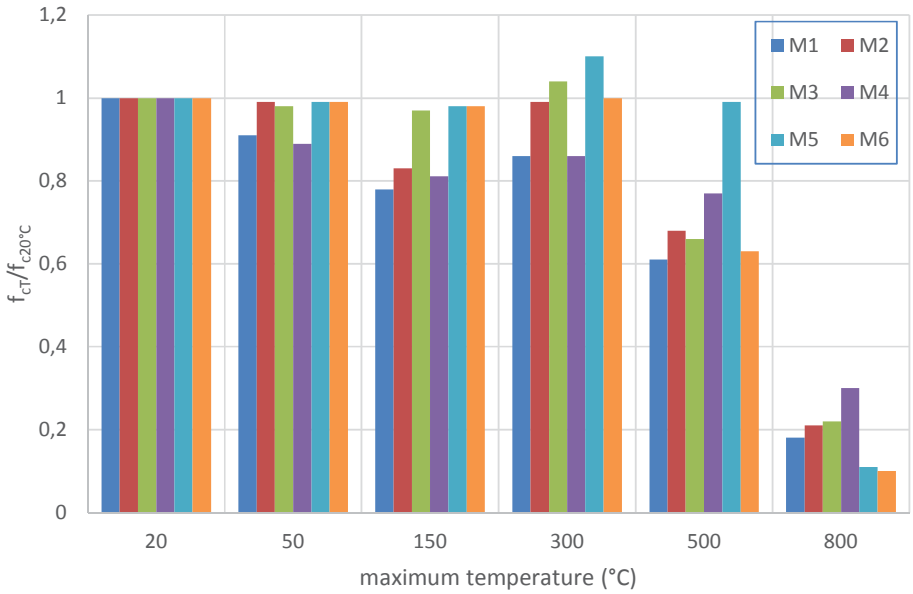


Figure 2. Relative residual compressive strength for the different concrete mixes as a function of maximum temperature (averages of 3 measurements)

Thermoanalytical tests

Thermoanalytical tests (TG/DTG/DTA) were carried out on cement paste specimens. Samples of thermoanalytical tests were freshly ground powder samples protecting them from the carbonation due to airborn carbon-dioxid (CO_2).

Typical thermoanalytical results of hydrated cement pastes are shown on Figure 3. Peaks of derivative thermogravimetric (DTG) and differential thermal analysis (DTA) curves indicate the loss of adsorptive water and the dehydration of AFt and/or AFm phases (e.g. ettringite and/or monosulphate) (peaks signed by 1. and 2.) as well as the dehydration of portlandite ($Ca(OH)_2$ (peaks signed by 3.) as a function of

increasing temperature (see Figure 3). About 800 °C the peaks indicated the decomposition of calcium-carbonate and calcium-silicate hydrates (peaks signed by 4.)

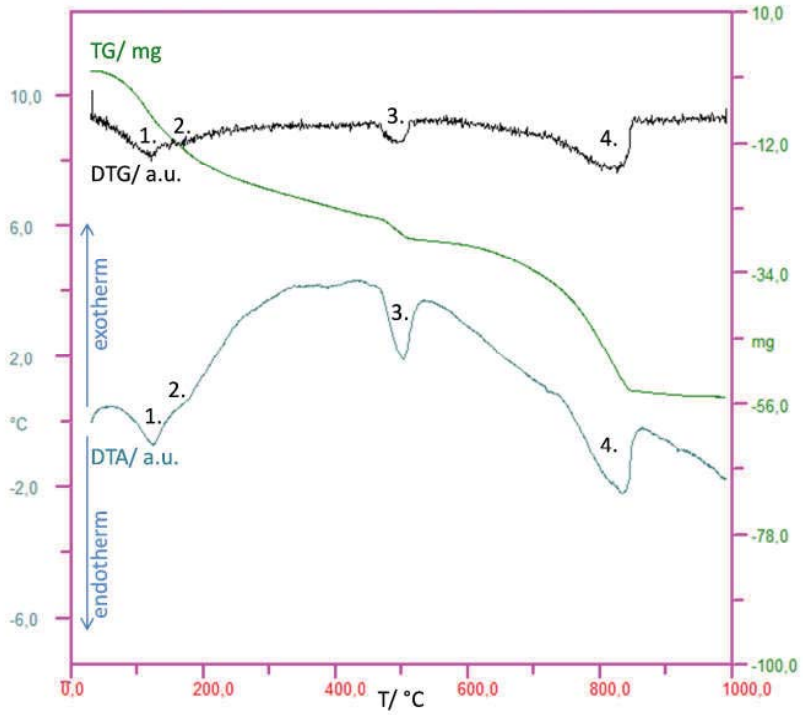


Figure 3: Thermoanalytical test results of hardened cement paste of CEM II/A-V 42,5 R at the age of 28 days

Differents in amounts of portlandite formed by the cement hydration support the results of the residual compressive strengths. In composite cements or cements mixered with different supplementary materials (silica fume or fly ash) less calcium-hydroxide is present at the age of the experiment (28 days) as in the ordinary Portland cement – this is the consequence of the pozzolanic reaction between SCM and portlandite; on the other hand the consequence of the diluting effect of the SCM. The decreasing thermogravimetric mass loss (TG) of portlandite dehydration in the case of increasing supplementary material contents in cements are in accordance with the results of relative residual compressive strengths. As a result of temperature load higher than 450 °C the portlandite phase in the samples dehydrated. The product of this process is calcium-oxid (CaO) which in the laboratory condition during cooling and storing easily rehydrate.

- Thermal tests indicated lower amount of water released due to the dehydration of portlandite in samples prepared from the composite cements as for the specimens of Portland cements. This is, on one hand, the result of the pozzolanic reaction between $Ca(OH)_2$ and the pozzolanic additive and, on the

other hand, the consequence of the replacement of the cement clinkers by the additive (diluting effect).
- Amount of $Ca(OH)_2$ formed due to the hydration process in the cement paste specimens of CEM I 42,5 R is higher as in case of Portland-composite cements or Portland cement mixed with SCMs (silica fume or metakaolin), tested in the same age (28 days).
- Hydration of CEM II/A-V 42,5 R consumes higher amount of $Ca(OH)_2$ as measured in samples of CEM II/A P 42,5 N in the same age (28 days. This resulted in by the different pozzolanic activity of the various constituents (fly ash or trass).
- The deterioration of the concrete specimens due to the applied heat load of 500 °C is caused by the released water during dehydration of portlandite.

CONCLUSIONS

An extensive experimental study was carried out to analyse the post-heating characteristics of concrete subjected to high temperatures up to 800 °C. Major parameters of our study were the type of supplementary materials of cement (slag, fly ash, trass, silica fume, metakaolin) and the level of maximum temperature (50, 150, 300, 500 or 800 °C). Present study included analyses of surface cracking and reduction of compressive strength.

Our observations indicated that:
- The most intensive surface cracking due to temperature loading was observed by using Portland cement without addition of supplementary materials.
- Tendencies of surface cracking and reduction of compressive strength were in agreement, i.e. the more surface cracks, the more strength reduction.
- Behavior of concrete and concrete elements at high temperatures may depend on the composition of concrete as well as the temperature behavior of components (e.g. cement type, supplementary materials).

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

REFERENCES

Bazant, P. Z., Kaplan, F. M. (1996). “*Concrete at High Temperetures.*” Longman Group Limited. London, ISBN: 0-582-08626-4

Budelman, H. (1987). “*Strength of concrete with different moisture content after elevated temperature.” (Zum Einfluss erhöhter Temperatur auf Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten),* Heft 76, ISBN 3-89288-016-6, Braunschweig

Gambarova, P. G. (2004). “Opening Adresses on Some Key Issues Concerning R/C Fire Design.” *Proceedings for Fire Design of Concrete Structures: What*

now?, What next? (Eds: P. G., Gambarova. R., Felicetti. A., Meda. P., Riva, December 2-3, 2004.

Eurocode 1 (2002) *Basis of design and actions on concrete structures. Part 2-2: Actions on structures exposed to fire*, EN 1991-1-2:2002, November 2002

Eurocode 2. (2002). "*Design of concrete structures. Part 1 General rules - Sructural fire design*." EN 1992-1-2:2002, February 25

Grainger, B. N. (1980). "*Concrete at High Temperatures*." Central Electricity Research Laboratories, UK

Hinrichsmeyer, K. (1987). "*Analysis and Modeling of Concrete Subjected to High Temperature". (Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton)* Heft 74 IBMB, Braunschweig

Hoj, N. H.(2005). "Fire Design of Concrete Structures. *Proceedings of fib Symposium on Keep concrete attractive* (Eds. G. L, Balázs. A. Borosnyói) 23-25 May 2005 Budapest, pp. 1097-1105.

Khoury, G. A. (1995). "*Effect of heat on concrete material*." Imperial College Report. 1995, pp. 73.

Pekár, Gy. (2013). "*Simple basic model for concrete and its application*." http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2013.22

Schneider, U., Weiß, R. (1997). "Kinethical treatment of thermical deterioration of concretes and its mechanical influences.", *Cement and Concrete Research*. 1997.11, pp. 22-29.

Thielen, K. Ch. (1994). "*Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress -Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung)*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH. Berlin

IFireSS 2017 – 2nd International Fire Safety Symposium
Naples, Italy, June 7-9, 2017

IMPROVED FIRE RESISTANCE BY USING DIFFERENT SUPPLEMENTARY MATERIALS



György L. Balázs[1]



Katalin Kopecskó[2]



Éva Lublóy[3]

ABSTRACT

Concrete is a composite material that consists mainly of mineral aggregates bound by a matrix of hardened cement paste. Composition and microstructure of hardened cement paste have important influences on the properties of concrete exposed to high temperatures.
An extensive experimental study was carried out to analyse the post-heating characteristics of hardened cement paste subjected to temperatures up to 800 °C. Major parameters of our study were the type (slag, fly ash, trass, silica fume, metakaolin) and the content (0, 3, 16 or 25 m%) of supplementary materials of cement and the value of maximum temperature (50, 150, 300, 400, 500, 800 °C). Present study includes analysis of surface cracking, compressive strength, while thermal changes in phases were followed by thermoanalytical methods (TG/DTG/DTA).

1 INTRODUCTION

1.1 Chemical transformation of concrete

Concrete is a composite material consists aggregates bound by a matrix of hydrated cement paste. The matrix is highly porous and contains a relatively large amount of free water unless artificially dried.
Composition and internal structure of hardened cement paste has an important influence on the properties of concrete exposed to high temperatures [1]. Characteristics of concrete during and after the heating process depend on the type of cement, the type of aggregate and the interaction between them [2-4].
Effect of cement type has been hardly studied. When exposed it to high temperatures, concrete undergoes changes in its composition, structure and water content. Such changes are reflected by

[1] Professor, Head of Department, Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest HUNGARY, balazs@vbt.bme.hu **Corresponding Author**.
[2] Associate Professor, Budapest University of Technology and Economics, Department of Engineering Geology and Geotechnics, H-1521 Budapest HUNGARY, kopecsko.katalin@epito.bme.hu
[3] Assistant Professor, Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest HUNGARY, lubloy.eva@epito.bme.hu.

changes in the physical and mechanical properties of concrete that are associated with temperature increase. Chemical changes can be studied with thermogravimetrical analyses.
The following chemical transformations can be observed by increase of temperature [3, 5, 6]: around 100°C part of the weight loss is caused by water evaporating from the micropores. The decomposition of ettringite ($3CaOAl_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$) occurs between 50 °C and 110 °C. At 200 °C there is further dehydration which causes small weight loss. The weight loss with various moisture contents was different till all the pore water and chemically bound water were gone. Further weight loss was not perceptible around 250-300 °C [3, 5, 6].
During heating the endothermic dehydration of $Ca(OH)_2$ occurs between the temperatures of 450 °C and 550 °C ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O\uparrow$) [2]. In case of concretes made with quartz gravel aggregate another influencing factor is the change of crystal structure of quartz α formation→ β formation at the temperature of 573 °C [7]. This transformation is followed by 5.7% volumetric increase [8].
Dehydration of calcium-silicate-hydrates was found at the temperature of 700 °C [9].

1.2 Residual compressive strength of concrete

Temperature influences are reflected in changes of physical and mechanical properties of concrete.
Residual compressive strength of concrete exposed to high temperatures is influenced by the following factors: water to cement ratio, cement to aggregate ratio, type of aggregate, type of cement, water content of concrete and the fire process [10].
The stress-strain relationship and the stresses and deformation capacities of fire exposed concrete are presented in *Fig.1.* Increasing temperature results decrease of concrete strength and increase of strain that belongs to the strength, especially for high temperatures [11].

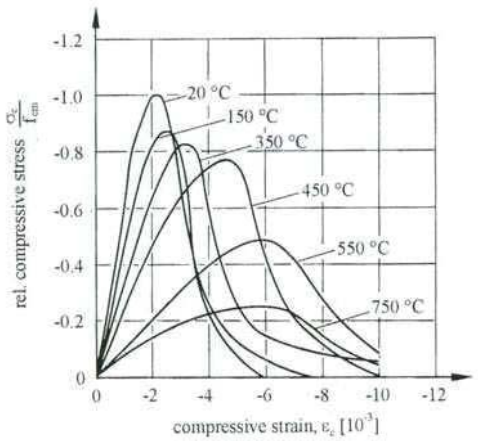


Fig. 1. Stress-strain relationship for concrete with quartz gravel aggregate as a function of temperature [11]

2 EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 Materials

1.1 Cements

Main purpose of our experimental study was to determine the influences of supplementary materials (slag, fly ash, trass, silica fume, metakaolin) content of cements on post-heating characteristics of hardened cement paste as well as that of concrete.
The following cements were involved in the comparative study to analyse the effect of addition of slag, fly ash and trass:

- *ordinary Portland cement* (CEM I 42,5 R);
- *Portland - slag cement* (CEM II/A-S 42,5 N);

- *Portland - fly ash cements* (CEM II/A-V 42,5 R; CEM II/B-V 32,5 R) and
- *Portland - trass cement* (CEMII/A-P 42,5 N).

Cement clinkers and additives were ground together during the production of cement. The chemical compositions of cements are given in *Table 1.*

In case of addition of *silica fume or metakaolin* the supplementary materials were added as replacement of the Portland cement (CEM I 42,5 R) before mixing. The amount of supplementary material was 0%, 3% or 6%.

Table 1. Chemical composition of tested cements (m%)

	CEM I 42,5 R	CEM II/A-S 42,5 N	CEM II/A-V 42,5 R	CEM II/B-V 32,5 R	CEM II/A-P 42,5 N
SiO_2	19.71	22.77	23.75	26.15	28.23
Al_2O_3	4.46	5.83	6.68	7.79	6.10
Fe_2O_3	2.97	2.97	4.73	5.33	3.42
CaO	64.59	60.30	55.31	50.48	54.54
MgO	1.0	2.51	2.66	2.64	1.0
K_2O	0.69	0.80	0.85	0.95	1.15
Na_2O	0.31	-	0.47	0.51	0.67
SO_3	2.63	2.97	2.79	2.81	2.84
Cl	0.02	0.0056	0.027	0.026	0.01

2.2 Test methods

The studied specimens were cubic cement paste specimens with sizes of 30 mm. The specimens were demoulded after 24 hours from the formwork, stored in water for 7 days and then kept at laboratory conditions (temperature 20±2 °C, ~65% relative humidity) until testing in accordance with the standard [12].

Testing of specimens started at the age of 28 days and finished at 30 days.

During testing the specimens were kept for two hours at the various maximum temperature levels (50, 150, 300, 400, 500 and 800 ºC). Specimens were then slowly cooled down in laboratory conditions for further observations.

The compressive strength was measured on the cooled down specimens and the average values of the measurements were analysed. Changes in phases were followed by thermoanalytical methods (TG/DTG/DTA) using Derivatograph-Q 1500 D. This equipment is able to collect TG/DTG/DTA data from the same measurement simultaneously. This is a simultaneous procedure where the TG (Thermogravimetry) and DTA (Differential Thermal Analysis) thermoanalytical methods can be combined. As the result of thermogravimetry (TG) the first derivative of thermogravimetric curve (DTG) is also obtained. Reference material was alumina (Al_2O_3), and 10 ºC min^{-1} heating rate was chosen up to ~1000 ºC. Tests were carried out in air atmosphere. Part of the specimens was ground in an agate mortar making powder form sample. Mass of sample was ~300 mg. For computational evaluation of the thermoanalytical test results Winder (Version 4.4.) software was used.

3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Visual observation

In the case of *Portland cement specimens* (CEM I 42,5 R) cracks already formed by heating up to 500 °C, and the size as well as the number of cracks considerably increased by heating up to 800 °C. Crack development is explained by the chemical reactions in the hardened cement paste, i.e. dehydration of portlandite, $Ca(OH)_2$ at about 450 °C and decomposition of CSH and $CaCO_3$ started at about 750 °C. With the increasing substitution of cement clinker by the supplementary material the production of portlandite during hydration in the hardened cement paste decreases; thus, less portlandite dehydrates at about 450 °C, which may give the explanation of decreased amount of cracks.

The supplementary materials are usually either latent hydraulic (GGBS) or pozzolanic materials with different pozzolanic activity (trass, fly ash, silica fume, metakaolin). During the hydration process they consume part of the portlandite forming calcium-silicate-hydrates. The other cause of the decrease of portlandite is the diluting effect: the higher the substitution rate of the clinker, the smaller the amount of portlandite formed due to the hydration of silicate clinkers that causes smaller amount of cracks *(Fig. 2)*.

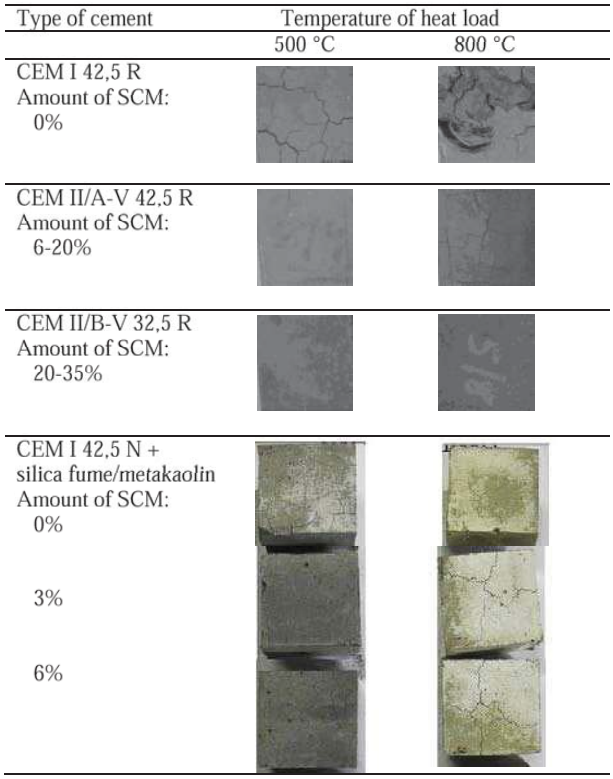


Fig. 2. Effect of type and amount of supplementary materials on the development of surface cracks as a result of the elevated temperature (hardened cement paste specimens, w/c=0.43)

3.2 Compressive strength

Our experimentally applied heating curve was similar to the standard fire curve up to 800 °C. Specimens were kept for two hours at the actual maximum temperature levels. Specimens were then slowly cooled down in laboratory conditions for further observations. During the heat load a program controlled electric furnace was used. The compressive strength was measured on the heat loaded and, than cooled down specimens and the average values of the measurements were analysed.

Residual compressive strength of cement stone specimens is shown in *Fig. 3* relating to the concrete composition and the maximum temperature of thermal load, from which the following conclusions can be drawn:

The relative residual compressive strength decreases up to 150 °C heat loading, then increases up to 300 °C. In the case of higher temperatures than 300 °C the residual relative compressive strength decreases again. Specimens loaded up to 300 °C show higher residual strength comparing with the average strengths measured on specimens loaded up to 150 °C because the intensive dehydration in

the temperature interval between 60 and 180 °C probably causes the hydration of the unhydrated cement grains in the microstructure. To sum up these results, the temperature load at 800 °C caused increasing residual relative compressive strength with the increase of content of supplementary materials. The results of the compressive strength tests are in accordance with the crack developments. The most significant cracks appeared on test specimens made of Portland cement, and the compressive strength loss was also the highest.

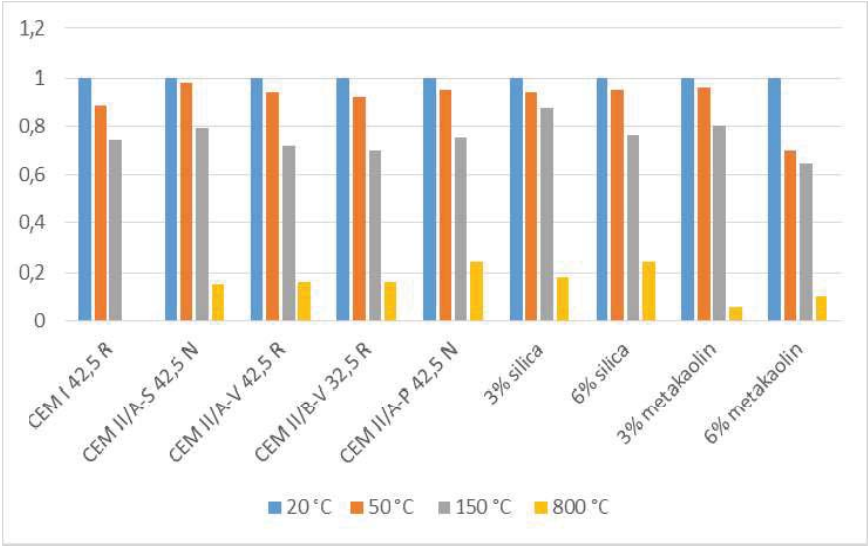


Fig. 3. Relative residual compressive strength for the different mixes as a function of maximum temperature (values are averages of 3 measurements)

3.3 Thermoanalytical test results

The thermoanalytical test results indicated the change in phases, e.g. dehydration of calcium-aluminate hydrate (CAH) phases or portlandite ($Ca(OH)_2$), then decomposition of calcium-carbonate ($CaCO_3$) as well as calcium-silicate hydrate (CSH) phases.

During the thermoanalytical test due to heating several heat reactions occur. Mean heat reactions of a hydrated cement paste are the next endothermic reactions as a function of increasing temperature: dehydration of ettringite ($C_3A{\cdot}3CaSO_4{\cdot}H_{32}$); dehydration of monosulphate ($C_3A{\cdot}CaSO_4{\cdot}H_{12}$); decomposition of portlandite ($Ca(OH)_2$); decomposition of CSH and $CaCO_3$ phases. The decomposition of CSH started at 560 °C but became significant only above 600 °C.

The thermogravimetric (TG) mass losses resulted by the decomposition (dehydration) of portlandite are different in case of the different types of cements. Crack development and residual strength values were confirmed by the thermogravimetric mass losses of the cement paste specimens due to the significant heat reactions (mostly by the dehydration of $Ca(OH)_2$ in case of specimens loaded at 500 °C and the decomposition of CSH/$CaCO_3$ in case of specimens loaded at 800 °C. The higher replacement ratio of cement clinkers by substituting materials, the smaller the portlandite formed during the hydration. SCMs consume $Ca(OH)_2$ in the pozzolanic reaction, which increases the amount of CSH. On the other hand, at the age of testing the specimens, part of the portlandite already reacted with CO_2 and calcium-carbonate was formed. The heat reaction of the already carbonated part of portlandite (calcium-carbonate) also influences the thermal behaviour of cement paste. On the other hand calcium-carbonate could presence from the initial cement composition, because the standardised cement products may incorporate about 3-5 m% calcium-carbonate (limestone ground together with the clinkers).

4 CONCLUSIONS

Main purpose of our experimental study was to determine the influences of supplementary materials (slag, fly ash, trass, silica fume, metakaolin) on the post-heating characteristics of hardened cement paste as well as that of concrete.

The following cements were involved in the comparative study to analyse the effect of addition of slag, fly ash and trass: *ordinary Portland cement* (CEM I 42,5 R); *Portland - slag cement* (CEM II/A-S 42,5 N); *Portland - fly ash cements* (CEM II/A-V 42,5 R; CEM II/B-V 32,5 R) and *Portland - trass cement* (CEMII/A-P 42,5 N).

Our results indicated that:

(i) the number and size of surface cracks as well as compressive strength changed by the increasing content of supplementary materials due to elevated temperature;

(ii) the most intensive surface cracking was observed by using Portland cement without addition of supplementary materials. The increasing contents of the supplementary material of cement changed different the relative post-heating compressive strength. Tendencies of surface cracking and reduction of compressive strength were in agreement, i.e. the more surface cracks, the more strength reduction. Thermoanalytic investigations indicated differences in thermogravimetric mass loss between 400 °C to 600 °C as a function of type and amount of supplementary materials.

ACKNOWLEDGMENT

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

REFERENCES

[1] Khoury G.A. et al. (2001). *Fire Design of Concrete Materials Structures and Modelling.* 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001.

[2] Khoury G.A. (1995). *Effect of heat on concrete material.* Imperial College report. pp 73.

[3] Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E. (1995). *Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents.* Magazine of Concrete Research. 37. pp 48-56.

[4] Budelman H. (1987). *Strength of concrete with different moisture content after elevated temperature. (Zum Einfluss erhöhter Temperatur auf Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten),* Heft 76, ISBN 3-89288-016-6, Braunschweig.

[5] Schneider U., Weiß R. (1997). *Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen,* Cement and Concrete Research, Vol 11, 1997, pp 22-29.

[6] Kopecskó K. (2006). Chloride ion binding capacity of clinker minerals and cements influenced by steam curing, PhD Thesis, http://www.doktori.hu/index.php?menuid=193&vid=2743

[7] Waubke N.V. (1973). *Physical analysis of strength reduction of concrete up to 1000 °C, (Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzement-betonen bei Temperaturen bis 1000 °C–Brandverhalten von Bauteilen),* Dissertation, TU Braunschweig.

[8] Høj N.H. (2005). *Fire Design of Concrete Structures,* Proceedings of *fib* Symposium on Keep concrete attractive, edited by Balázs Gy.L. and Borosnyói A., Budapest. pp 1097-1105.

[9] Hinrichsmeyer K. (1987). *Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton,* Heft 74, IBMB, Braunschweig

[10] Thielen K.Ch. (1994). *Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modelling (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung),* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, Beuth Verlag GmbH, Berlin

[11] Schneider U., Lebeda C. (2000). *Baulicher Brandschutz,* Stuttgart; Berlin; Köln: Kohlhammer.

[12] MSZ EN 196-2:2013 *Methods of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement.*

5th INTERNATIONAL CONFERENCE
Contemporary achievements in civil engineering 21. April 2017. Subotica, SERBIA

FIRE: STRUCTURAL AND MATERIAL CONSEQUENCES

Balázs L. György[1]
Éva Lublóy[2]

UDK: 614.84:624.9
DOI:10.14415/konferencijaGFS2017.003

Summary: *In addition to the mechanical properties, behaviourstructural materials at elevated temperatures is also of high importance. Present paper deals with the effects of fire attack on concrete or concrete structures in Hungary. Residual compressive strength of concrete exposed to high temperatures is influenced by the following factors: water to cement ratio, cement to aggregate ratio, type of aggregate, water content of concrete before exposing it to high temperatures and the fire process. Therefore, mix design and composition of concrete are of high importance.Material and structural behavior are analyzed at high temperatures, which, based on practical observations, could reach even 1100°C in some cases. Relationship of concrete mix design and structural behaviour arediscussed with test results on prestressed concrete beams. By the analysis of earlier fire attacks, important information can be obtained for future fire design.The fire cases of the Budapest Sports Hall (1999) and of the Athletic Hall of the University of Physical Education in Budapest, Hungary (2015) are also summarized in our paper.*

Keywords:*fire, deterioration, temperature dependent material properties, concrete, spalling*

1. INTRODUCTION

Concrete has excellent properties at high temperatures compared to other structural materials. Concrete can also be used to protect other structural materials such as steel [1]. Effects of high temperatures on the mechanical properties of concrete have been studied as early as the 1940s[2]. In the 1960s and 1970s fire research was mainlydirected to study the behaviour of concrete structural elements [3].There was relatively little information on the concrete properties during and after fire [4].
The mechanical characteristics of the concrete are changing subjected to fire. During the cooling process concrete is not able to recover its original characteristics. Deterioration of concrete at high tempratures has two forms: (1) local damage in the material itself (*Figure 1*) and globaldamage resulting the failure of the elements (*Figure 2*).

[1]Professor, Head of Department, Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest Hungary, balazs.gyorgy@epito.bme.hu
[2]Assistant professor, Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest Hungary, lubloy.eva@epito.bme.hu

Temperature influences are reflected in changes of physical and mechanical properties of concrete. Residual compressive strength of concrete exposed to high temperatures is influenced by the following factors [5]:



Figure 1. Damage of concrete



Figure 2. Damage of structure (http://www.polizia.ti.ch)

(1) water to cement ratio,
(2) cement to aggregate ratio,
(3) type of aggregate,
(4) type of cement,
(5) water content of concrete before exposing it to high temperatures and
(6) fire process.

Spalling of concrete cover may have two main reasons: (1) internal vapour pressure (mainly for conventional concretes) and (2) overloading of concrete compressed zones (mainly for high strength concretes).

2. OUR EXPERIMENTAL STUDIES

Purpose of our experimental study was to improve fire resistance of a typical thin webbed prestressed pretensioned concrete roof girder. Owing the small thickness of the web (*Fig. 4),* special considerations were needed to modify the composition of concrete mix. The reference concrete grade was C50/60.

2. 1 Testing of material properties

Preliminary fire tests indicated inadequate fire resistance of a typical thin webbed (60 mm, thickness), prestressed pretensioned roof girder. The self-compacting concrete (SCC) mix included limestone as filling material. Cement type was CEM I 42.5 N. This composition and the very low thickness of web resulted early spalling of concrete cover.

In order to be able to improve fire resistance of the concrete mix as well as that of the girder, our intension was directed to optimize the concrete mix without changing the geometry of thegirder. Therefore, we decided to modify the concrete composition:

1. changing the filling material from limestone to slag in addition to (*Table 1*)
2. adding polypropylene fibres to the mix (1kg/m^3 or 2kg/m^3, (*Table 1*).

Table 1. Test parameters (all other parameters were the same for the mixes)

Concrete mix	filling material	PPfibres	material test 20°C, 600°C, 800°C	beam test
Mix 1 (reference)	limestone	0 kg/m^3	+	+
Mix 2	limestone	1 kg/m^3	+	-
Mix 3	limestone	2 kg/m^3	+	+
Mix 4	slag	1 kg/m^3	+	+

Material tests were carried out on cube specimens of 150 mm sides kept 2 hours on 600 °C or 800°C then cooled down to room temperature. Material tests were carried out at the Department of Constructions Materials and Technologies, Budapest University of Technology and Economics. In case of our reference mix (Mix 1) a special type of failure occurred during the heating process within the temperature range of 600 to 800°C. Some corners of the cube specimens cracked off. This phenomenon could be explained by the stress concentrations in corner regions due to the high temperatures. Stress concentrations in the corners may indicate deterioration of structural performance of an element or possible spalling of concrete cover. By addition of 1 kg/m^3 polypropylene fibres, failure of the specimen (corner cracking) did not occur, however, surface cracking was observed.By further increase of fibre content 2 kg/m^3 PP fibres instead of kg/m^3, the relative residual compressive strength decreased by about 8%. We have observed the highest relative residual compressive strength by changing the filling material from limestone to slag and including also 1 kg/m^3 polypropylenefibres subjected to 800°C *(Figure 3).*

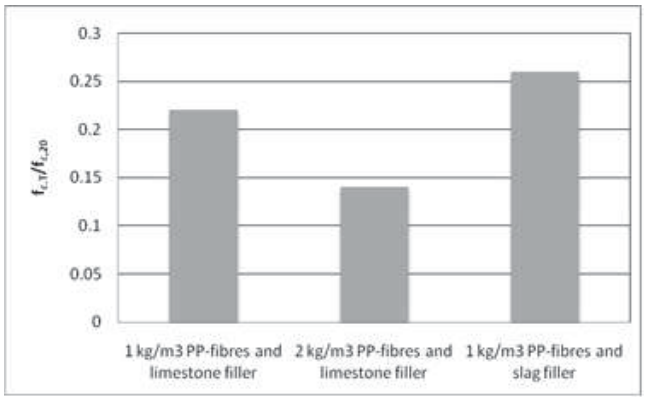


Figure 3.Measured relative, residual compressive strength values for tested concrete mixes with 800°C (every point is an average of 3 measurements, relative values are related to those at 20°C)

2. 2 Tests with beam elements

Fire tests on beam specimens were carried out with mixes 1, 3 and 4 (*see Table 1*), in Fire Laboratory of ÉMI Nonprofit Ltd. The heating curve for the furnace was the following:

$$T = 345 \log_{10} (8\,t + 1) + 20$$

where

T is the average furnace temperature (°C)

t is the time (min).

The temperature increase was controlled by thermocouples during the heating process.

a) b)

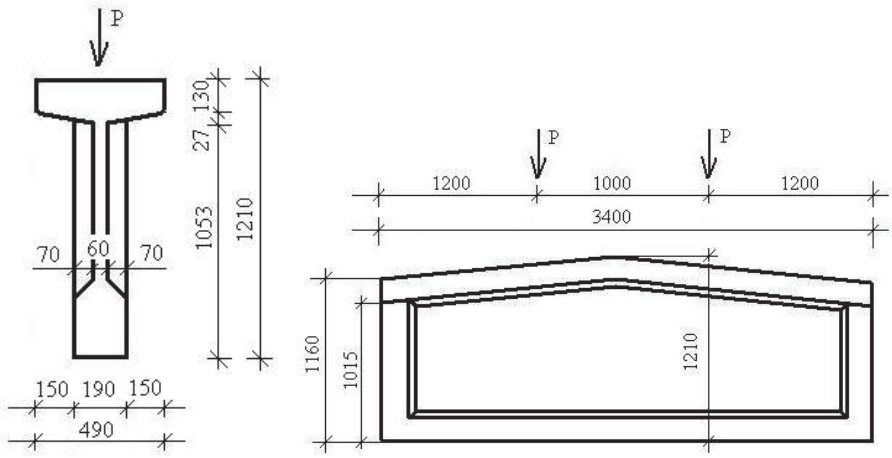


*Figure 4.*Tested beam specimens [6]
a) Cross - section of beam b) View of beam

The length of beams was 3.4 m. The prestressing force was 130 kN. First, the beam was loaded with P=2 × 350 kN during the fire test *(Figure 4).* Test beam with reference mix (Mix 1) failed in 12 minutes owing to the complete spalling of concrete cover of the web (*Fiure5*).Test beam with Mix 2 including 1 kg/m^3 polypropylene fibres failed in 42 minutes in shear (without spalling of concrete cover).Test beam with Mix 4 including 1 kg/m^3 polypropylene fibres and slag as filling material instead of lime stone failed in 67 minutes in shear (without spalling of concrete cover).



Figure 5.Beam with the reference concrete (Mix 1) after failure



Figure 6.Beam with Mix 4 after failure2010, Szentendre, Hungary [7]

3. RECENTLARGE FIRE CASES IN BUDAPEST

The Budapest Sports Hall in Budapest, Hungary was designed in the period from 1974 to 1978. The diameter and the height of the double-walled cylindrical hall were 120 and 26 meters, respectively. In the rectangular jetty attached to the main building, the training halls were located [8]. For the roofing of the Sports Hall a cable covering technique was used that was developed and tested in the Soviet Union. The hall's structural system was mainly composed of two parts: at firs the circularly positioned rows of pillars bearing the purely steel structure cable suspension roof and the steelwork supporting the upper floors of the ring-shaped building, secondly the reinforced concrete structure grandstand encircling the arena, as well as the connected 1st and 2nd floor ceiling-elements. In general, the bearing structural elements of the building were made of reinforced concrete. The Budapest Sports Hall became a favourite venue of business seminars, and general meetings of banks and share companies [9]. Not only the inflammable materials were destroyed or damaged by the fire of 15 December 1999, but the bearing structure suffered also permanent deformations and structural damage in the materials, therefore, the demolishion of the Sports Hall was decided [10].
The intensity of the fire can be judged from its long duration (3 hours), and from the extent of the damage of different structures. Based on the damages caused by this particular fire case, the general conclusion may be drawn that large part of the structure were exposed to high temperature (800-900 °C, or incidentally even higher) for long duration [11].
No considerable damage could be observed by visual observation of the load bearing structure. At some parts signs of dislocation and inside tension could be ascertained. The concrete fittings at the ends of the beams weighing on pillars partly broke off.
Fire damages in the ground level were so severe –especially in the area close to the arena –that such deformations could be noticed which locally endangered the stability of the building's bearing structures. The bounding reinforced concrete masonry of the arena was severely damaged by the fire, and a considerable part of its surface became cracked and broken. At some parts the reinforced concrete beams and U-panels were broken and cracked, where the concrete was pink-coloured. 70-80% of the floor structure was also considerably cracked and broken.



Figure 7. The deformed steel rings, Budapest Sports Hall, Dec. 1999[10]

There were cracks on the concrete structures of the 1st and 2nd floors, however these did not influence considerably the bearing capacity and stability of the structure. On the 1st floor 25%, while on the 2nd floor 10-15% of the bearing structures deteriorated in such an extent that measures had to be taken. The most considerable strength and structural damages were observed in the materials of the area of the cloakroom on the 1st floor, where, all concrete structures suffered strong or medium damages. The damages of the pillars were not significant, however the displacements and cracks implied structural movements. On the basis of inspection it could be said that the 2nd floor suffered lower fire attack; here, damages of smaller extent of probably local character occurred. The bearing structures suffered the most severe damages on the 3rd floor. The steel structures suffered considerable deformations *(Figure 7)* during the fire.
The 4th floor of the ring-shaped building was mainly exposed to underneath thermal load; therefore, the floor structure of the ceiling, which confined this level from beneath suffered major damage.
At about 5 o' clock early morning 15 October 2015 the ***Athletic Hall of the University of Physical Education in Budapest***, Hungary caught fire. The fire — in the nearly 3000 m2 hall — could only be extinguished at the early afternoon. The steel truss roof system completely collapsed. The hall became unusable. Our first experiences about the behaviour of steel and concrete elements subjected to fire are summarised below.
At some locations the temperature of the reinforced concrete was higher than 500 °C [12]. Explosive spalling of the concrete cover was observed on the pillars and the beams *(Figure 8.a)*. Stability failure of precast concrete wall elements and slab elements occurred, due to the failure of the steel elements *(Figure 8.b).*



Figure 8.. a) Explosive spalling of the concrete cover, b) stability failure of concrete slab Univ. of Physical EducationOct. 2015, Budapest, Hungary [12]

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Concrete is a composite material, that consists mainly of mineral aggregates bound by a matrix of hydrated cement paste, and may suffer in fire. The matrix is highly porous and contains a relatively large amount of free water unless artificially dried. When exposed it to high temperatures, concrete undergoes changes in its chemical composition, physical structure and water content. These changes occur primarily in the hardened cement paste in unsealed conditions. Such changes are reflected by changes in the physical and

mechanical properties of concrete that are associated with temperature increase. Deterioration of material characteristics and structural performance highly depend on constituents and on the temperature history. In order to understand the complex phenomenon due to high temperatures in concrete an extensive study was carried out including filling materials, polypropylene fibers. Our studies were resulted to both material tests, beam tests and structures subjected to high temperatures.

1. Results of material tests

In case of our starting mix (reference mix, Mix 1) cube specimens failed during the heating process within the temperature range of 600 to 800°C. By addition of 1 kg/m^3 polypropylene fibres, failure of the specimen (corner cracking) did not occur, however, surface cracking was still observed.The highest relative residual compressive strength as well as the minimum amount of surface cracking were observedby changing the filling material from limestone to slag and including also 1 kg/m^3 polypropylenefibres subjected to 800°C.

2. Results of beam tests

Test beam with reference mix (Mix 1) failed in 12 minutes owing to the complete spalling of concrete cover of the web. Test beam with Mix 2 including 1 kg/m^3 polypropylene fibres failed in 42 minutes in shear (without spalling of concrete cover). Test beam with Mix 4 including 1 kg/m^3 polypropylene fibres and slag as filling material failed in 70 minutes in shear (without spalling of concrete cover).

3. Structural behaviour

In case of the *Budapest Sports Hall*: there were cracks on the concrete structures of the 1st and 2nd floors, however these did not influence considerably the load bearing capacity and stability of the structure. On the 1st floor 25%, while on the 2nd floor 10-15% of the load bearing structures deteriorated in such an extent that measures had to be taken. The most severe strength and structural damages were observed in the materials at the area of the cloakroom on the 1st floor.

In case of slab-interjoists systems: the slabs were damaged due to the fire. Some of the pretensioned E-girders were cracked. The concrete became red-coloured, indicating that the maximum temperature was around 500 °C. The bottom parts of the concrete and the brick interjoists fall down.

In case of the *Athletic Hall of the University of Physical Education in Budapest*: explosive spalling of the concrete cover was observed on the pillars and the beams and stability failure of precast concrete wall elements and slab elements was caused by the failure of the steel elements.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemicalcorrosion, fire or freeze-thaw”.

REFERENCES

[1] Khoury, G. A., Grainger, B. N., Sullivan, P. J. E. Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, No. 132, **1985** pp. 37-48.

[2] Schneider, U. (1988): "Concrete at high temperatures-a general review", *Fire Safety Journal*, Vol 13, **1988**, pp. 55-68

[3] Kordina, K. (1997): „Fire resistance of reinforced concrete beams" (Über das Brandverhalten punktgeschützter Stahbetonbalken), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin, **1997.**

[4] Waubke, N. V. Physical analysis of strength reduction of concrete up to 1000 °C (Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzement−betonen bei Temperaturen bis 1000 °C−Brandverhalten von Bauteilen), Dissertation, TU Braunschweig, **1973**.

[5] Thielen, K. Ch. Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modelling (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung), *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 437 Beuth Verlag GmbH, Berlin, **1994**.

[6] Lublóy E. and Balázs G.L.Modifications of material properties due to elevated temperatures.*Advances in Construction Materials*, 23-27 July 2007, ISBN 978-3-540-72447-6, (Ed. Grosse Ch. U.), Springer, **2007**.

[7] Balázs G. L., Lublóy Ė. and Mezei S. Potentials in concrete mix design to improve fire resistance.*Concrete Structures Journal*,**2010**,Vol. 11, pp.: 19-24.

[8] Enyedi, L.: Our new sports establishment: The Budapest Great Hall, Almanac of the review "Life and sience" (In Hungarian: Új Sportlétesítményünk: a Budapesti Nagy Csarnok, Élet és Tudomány Kalendáriuma), **1980.**

[9] Bátor ,T.: The Budapest Sports Hall Budapest, The National Stadion and its institution Sportcsarnok, Népstadion és Intézményei, **1994.**

[10] ÉMI.: Expertise on the fire-damaged structures of the Budapest Sports Hall (In Hungarian: Szakértői vélemény a Budapest Sportcsarnok tűzkárt szenvedett épületszerkezeteiről), **2000.**

[11] Majoros É., Balázs G. L.: Degree of deterioration due to fire in large concrete halls, *Periodica polytechnika-civil engineering*, **2004**, Vol. 48 Nr.1-2 pp. 141-156tf.hu (2011): http://tf.hu/hirek/9529/diplomaoszto-2/ (downloaded: 2015. 12. 08.)

[12] Lublóy É., Czoboly O., Hlavička V., Oros Zs., Balázs L. Gy. Experiences of the fire case of athletic hall of the University of Physical Education in Budapest 15 Oct. 2015 (In Hungarian: Testnevelési Egyetem atlétikai csarnok Budapest, tűzeset 2015. október 15. – következmények), *Vasbetonépítés*, **2015**, ISSN 1419-6441, online ISSN: 1586-0361, Vol.17, No. 3, pp. 50-55.

TŰZ HATÁSAI A BETON SZERKEZETÉRE – Helyzetfelmérő jelentés

2017/2 • VASBETONÉPÍTÉS

Dr. Balázs L. György – Dr. Lublóy Éva – Dr. Kopecskó Katalin – Dr. Salem G. Nehme – Dr. Nemes Rita – Dr. Kausay Tibor – Dr. Józsa Zsuzsanna – Hlavička Viktor – Kakasy Gergely – Tóth Péter – Nyíri Szabolcs – Lizakovszky Géza – Molnár Tamás – Czirják János – Földes Tamás – Abdelmelek Nabil – Abed Mohammed – Alimrani Naser

Az utóbbi évtizedekben számos épületkatasztrófa igazolta, hogy a tűzteherre való méretezés kérdései továbbra is aktuálisak. A különböző hőmérsékleti tartományokban a betonban lejátszódó legfontosabb fizikai és kémiai folyamatok jelentősen befolyásolják a beton magas hőmérséklet hatására kialakuló anyagtulajdonságait. A beton tűzterhelés hatására bekövetkező tönkremenetele alapvetően két okra vezethető vissza a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására, illetve a betonfelület réteges leválására. A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ: a cement típusától, az adalékanyag típusától, a víz-cement tényezőtől, az adalékanyag-cement tényezőtől, a hőterhelés módjától és a lehűtés módjától. Magas hőmérséklet hatására a beton szerkezete megváltozik, jelen cikkben ezen változásokat ismertetjük.

Kulcsszavak: beton, magas hőmérséklet, tűz, robbanásszerű leválás

1. BEVEZETÉS

A tűz, illetve a magas hőmérséklet az építőanyagokra mindenképpen extrém terhelést jelent. Tűz hatására az építőanyagok szilárdsági, illetve merevségi jellemzői különböző mértékben változnak. Jelen cikk keretein belül a beton anyagszerkezeti, illetve szilárdsági jellemzőinek tűz hatására bekövetkező változását ismertetjük. A cikk célja, hogy a mérnökök számára érthetővé tegye a tűz hatására bekövetkező anyagszerkezeti változásokat, és következményeit (szilárdság, hőtágulás, törési összenyomódás, lehajlás).

2. A BETON VISELKEDÉSE TŰZ HATÁSÁRA

A hőmérséklet emelkedésével a beton szilárdsági jellemzői romlanak. A beton a lehűlés során sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, és végezetül tönkremegy. Az összegződő alakváltozások mértéke olyan nagy lehet, hogy a közvetlenül tűztehernek ki nem tett szerkezeti elemek is károsodhatnak.

A vasbeton szerkezetek tönkremenetele alapvetően a következő két okra vezethető vissza (Balázs, Lublóy, 2009):
- a beton alkotóelemeinek kémiai és fizikai átalakulására,
- a betonfelület réteges leválására.

2.1 A beton alkotóelemeinek kémiai és fizikai átalakulása

A betonban a hőmérséklet hatására lejátszódó kémiai folyamatok alakulását termoanalitikai módszerekkel (TG/DTG/DTA) vizsgálhatjuk. A TG (termogravimetriás) és a DTG (derivált termogravimetriás) görbék segítségével a tömegváltozással járó átalakulások mennyiségi elemzése végezhető. A DTA (differenciál termoanalízis) görbékkel nyomon követhetjük a hőmérséklet növekedésének hatására

1. ábra: A vasbetonszerkezetek tönkremenetelének okai



a) a beton változása a hőmérséglet hatására



b) a betonfelület leválása

bekövetkező exoterm (hőtermelő) vagy endoterm (hőelnyelő) folyamatok alakulását (Thielen, 1994). A betonban bekövetkező jelenségek a hőmérséklet növekedése során:

100 °C körül a makropórusokból távozó víz tömegveszteséget okoz.

50 °C és 110 °C között következik be az ettringit ($3CaO•Al_2O_3•3CaSO_4•32H_2O$) bomlása (Hinrichsmeyer, 1987).

100 °C és 200 °C között a gipsz kétlépcsős bomlása következik be.

200 °C körül további dehidratációs folyamatok zajlanak le, amelyek a tömegveszteség újabb, kismértékű növekedéséhez vezetnek. A különböző kiinduló nedvességtartalmú próbatestek tömegvesztesége eltérő lesz egészen addig, amíg a fizikailag és kémiailag kötött víz el nem távozik.

300 °C felett már a kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség nem érzékelhető.

450 °C és 550 °C között a nem karbonátosodott portlandit (kalcium-hidroxid) bomlása következik be ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O\uparrow$). Ez a folyamat endoterm (hőelnyelő) csúcsot, és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz (Hinrichsmeyer, 1987).

573 °C-on a szokványos betonok esetén a kvarc α módosulatból β módosulatba való kristályátalakulása okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc ezen átalakulása 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár (Hoj, 2005), ami a beton lényeges károsodását eredményezheti.

700 °C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogatnövekedéssel és további szilárdságcsökkenéssel jár (Hinrichsmeyer, 1987).

A porozitás változása a hőmérséklet hatására:

150 °C-ig a cementkő porozitása, valamint az adalékanyag és a cementkő közötti kontakt zóna porozitása kvarckavics adalékanyagú betonoknál nő.

150 °C felett a kontakt zónában repedések keletkezhetnek, amit az adalékanyag és cementkő különböző hőtágulásával magyarázhatunk.

450 °Cig a cementkő struktúrája stabil, de mikrorepedések már ezen hőmérséklet alatt is keletkezhetnek.

450–550 °C között a portlandit bomlása miatt a porozitás megnő.

650 °Cig a cementkő felépítése nem változik.

650 °C felett a CSH vegyületek bomlása megkezdődik, és a kapillárisok száma megnő.

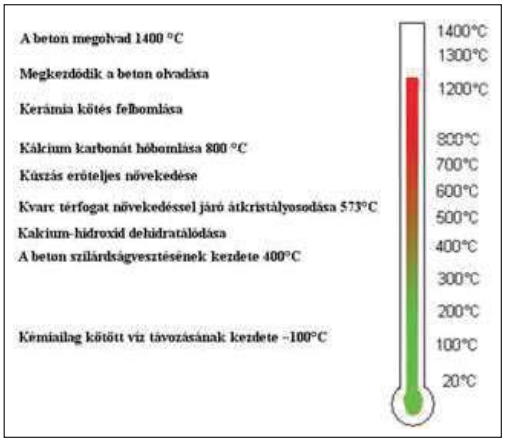
750 °C felett a pórusok átmérője nagymértékben növekszik. A különböző mikrorepedések mérete függ az adalékanyag legnagyobb szemnagyságától.

A hőmérséklet emelkedésének hatására a betonban bekövetkező fizikai és kémia változásokat a *2.* ábrán adjuk meg.

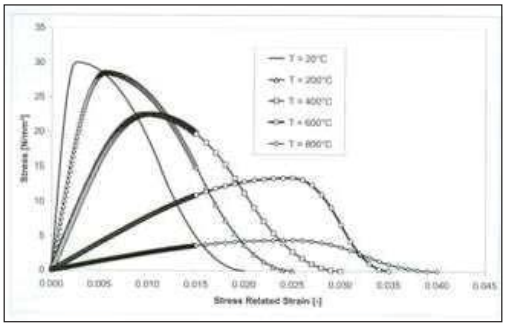
A beton σ–ε diagramjának változását a hőmérséklet függvényében a *3. ábrán* mutatjuk be. A görbe csúcspontja eltolódik, ami azt jelenti, hogy a szilárdság csökken, de a törési összenyomódás nő.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ (Thielen, 1994).:

- a cement típusától,
- az adalékanyag típusától,
- a víz-cement tényezőtől,
- az adalékanyag-cement tényezőtől,
- a beton kezdeti nedvességtartalmától,
- a hőterhelés módjától.



2. ábra: Fizikai és kémia változások a beton melegedése során (Hoj, 2005)



3. ábra: Különböző hőmérsékletű betonok σ-ε diagramja (fib, 2007)

2.2 Betonfelület réteges leválása

A vasbeton szerkezetekben a betonfelület réteges leválása a statikai rendszer átalakulását eredményezheti *(4. ábra)*. A betonfelület réteges leválásának veszélyét a megfelelő szerkezeti kialakítással és a megfelelő anyagválasztással lényegesen csökkenthetjük. Itt megjegyezzük, hogy a méretezési eljárások nem használhatóak, ha a betonfelület réteges leválása bekövetkezik.

A betonfelület réteges leválását a következő tényezők befolyásolják:

- külső tényezők: a tűz jellege, a szerkezetre ható külső terhek nagysága;
- geometriai jellemzők: a szerkezet geometriai adatai, a betonfedés nagysága, a vasbetétek száma és elhelyezkedése;
- a beton összetétele: az adalékanyag mérete és típusa, a cement és a kiegészítő anyag típusa, a pórusok száma, az esetleges polipropilén szál, illetve acélszál adagolás mértéke valamint a beton nedvességtartalma, áteresztőképessége és szilárdsága (***fib***, 2007).

A betonban ébredő feszültség függvényében változik a felület réteges leválásának veszélye. A nyomófeszültségek korlátozásával késleltethető vagy megakadályozható a betonfelület réteges leválása. Fontos, hogy a betonfelületek leválását elkerüljük A betonfelületek leválásának az esélyét műanyag (polipropilén) vagy acélszálak adagolásával csökkenthetjük (***fib***, 2007). Chen kutatásai alapján az acélszál adagolás a 400 °C és 600 °C között keletkező repedések számát csökkentette, ezáltal a betonfelületek leválásának az esélyét



4. ábra: A betonfelület leválása egy gerendán

is csökkentette (Chen et al, 2014). Számos kísérlet igazolta, hogy a betonfelület leválásának veszélye rövid kis átmérőjű polipropilén műanyagszálak alkalmazása esetén lényegesen kisebb, mivel a szálváz kiégése során létrejövő pórusszerkezet a szétrepedés veszélyét csökkenti (Dorn, 1993).

Mörth et al (2005) alagútelemekkel (hosszúság 11 m, magasság 2 m) végzett kísérletei igazolták, hogy a polipropilén szálakkal erősített betonok felületének réteges leválása a tűz hatására (1200 °C-os hőterhelés esetén) nem következett be.

Hasonló eredményre jutott Ausztriában egy másik kutatócsoport is (Waltner et al, 2005), amely nyomott lemezeket vizsgált. A hagyományos betonnál két órás tűzterhelés hatására következett be a betonfelület réteges leválása, a polipropilén száladagolással készített lemez esetében viszont ez nem volt észlelhető.

Lényeges kérdés azonban, hogy – mindezen előnyös tulajdonságok mellett – a szálerősítésű beton nyomószilárdságának csökkenése se legyen drasztikus a szokványos betonhoz képest. Horiguchi (2005) a szálerősített betonok nyomószilárdságát vizsgálta magas hőmérsékleti tartományokban. A nyomószilárdságot 100 mm átmérőjű, 200 mm magas hengereken szobahőmérsékletre visszahűlve vizsgálta. A felfűtés sebessége 10°C/perc volt, a próbatesteket 1 órán át tartotta az adott hőmérsékleten. Az alkalmazott beton vízcement tényezője 0,3 volt (583 kg/m^3-es cementadagolással). Az első beton szálerősítés nélkül, készült, a második 0,5 V%- os polipropilén száladagolással, a harmadik 0,5 V%- os acélszál adagolással, a negyedik 0,25 V%- os polipropilén és 0,25 V%- os acélszál adagolással készült. A nyomószilárdság értékei a szálerősítés nélküli és a szálerősítésű betonok esetén hasonló tendenciát mutatnak. A szálerősítés nélküli és a műanyag száladagolású betonok esetén jóval alacsonyabb értékek figyelhetők meg a 200°C-os, illetve a 400°C-os hőterhelést követően, mint az acélszál, illetve a hibrid (0,25 V%-os polipropilén és 0,25 V%-os acél) száladagolás esetén. A fokozott szilárdságcsökkenést a műanyagszálak alkalmazása esetén műanyagszál-váz kiégése, valamint a kiégés során megnövekedett porozitás okozhatja.

2.3 Vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására

Tűz hatására a vasbeton, illetve a feszített vasbeton szerkezetek számos változáson mennek keresztül, amelynek hatása lesz a szerkezet viselkedésére, teherbírására. A szerkezet hőmérsékletének emelkedése és az utána következő lehűlés során a következő változások vezethetnek a szerkezet teherbírásának csökkenéséhez:

- alakváltozás a hőmérséklet illetve a terhelés hatására;
- a keresztmetszetben bekövetkező hőmérsékletváltozás;
- a levegő hőmérsékletének nemlineáris emelkedése (amelyet a tűzgörbékkel modellezünk);
- a hőterhelésből származó repedések méretének változása (tágasság és hosszúság);
- a cement és az adalékanyag eltérő hőtágulása;
- a beton és az acél szilárdságának változása;
- a beton és a betonacél eltérő hőtágulása.

A hőtágulás, valamint a betonacél és a beton közötti tapadás hőmérséklet hatására bekövetkező változása miatt a szerkezeti részek kialakítását körültekintően kell elvégezni.

3. A BETON TŰZTERHELÉS ALATTI VISELKEDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐINEK HATÁSA

3.1 A beton szilárdsági értékeinek alakulása hőterhelés után a cement típusától függően

Schneider (1986) kísérleti eredményei nem mutattak jelentős eltérést a portlandcement és a kohósalak cement felhasználásával készült betonok hőterhelés utáni a nyomószilárdságára vonatkozóan.

Későbbi kutatások azonban nagyobb jelentőséget tulajdonítottak a cement összetételének a beton maradó nyomószilárdsága szempontjából, hiszen a beton szilárdságcsökkenése függetlenül az adalékanyagtól bekövetkezik, és a kémiai folyamatok többsége a cementkőben játszódik le. Az adalékanyagot összekötő cement mátrix tulajdonságai tehát jelentősen befolyásolhatják a beton viselkedésének változását a hőmérséklet emelkedésének hatására (Balázs, Lublóy, 2009).

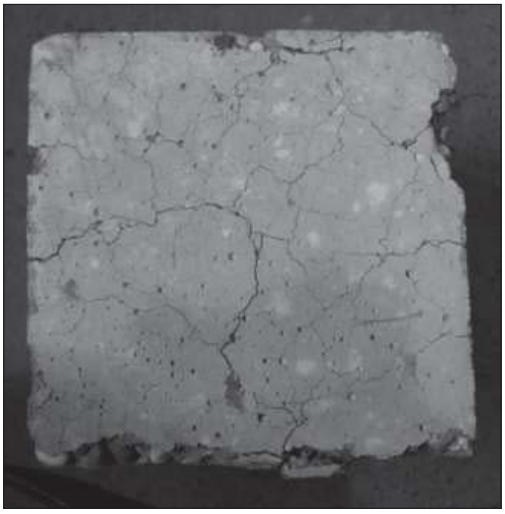
Lényeges kérdés, hogy a cement típusa, hogyan befolyásolja a beton magas hőmérséklet utáni viselkedését. Ezért kísérleteket végeztünk, hogy a cementtípus hatását a magas hőmérsékleten való viselkedését megismerjük. Kísérleteink során a kvarckavics adalékanyagú beton hőterhelés hatására bekövetkező maradó nyomószilárdságának változását négy fajta cement felhasználásával:

- portlandcement CEM I 42,5 N;
- kohósalak-portlandcement, CEM II/A-S 42,5 N;
- kohósalak cement, CEM III/A 32,5 N, CEM III/B 32,5 N-S) vizsgáltuk.

Először a próbatesteken keletkező felületi repedéseket elemeztük, mivel a próbatesteken a hőterhelés után kialakult felületi repedések mértéke előzetes jelzést ad a maradó nyomószilárdság alakulásáról. A próbatestek szemrevételezéséből a következő megállapításokat tettük:

- 800 °C-os hőterhelés következtében a *portlandcementtel* készült kvarckavics adalékanyagú beton felületén sok repedés keletkezett (*5. ábra).*
- 800 °C-os hőterhelést követően a *kohósalak cementtel* készült kvarckavics adalékanyagú beton felületén kevés hajszálrepedés keletkezett *(6. ábra).*
- A *kohósalak cement tartalmú betonoknál* a hőterhelés kevesebb repedést eredményezett, mint a tiszta portlandcement felhasználásával készült betonoknál.

A kvarckavics adalékanyaggal készült beton maradó nyomószilárdságát a cement típus és a hőterhelés maximális



5. ábra: CEM I 42,5 N jelű cementtel készült beton repedésképe a 800°C-os hőterhelést követően

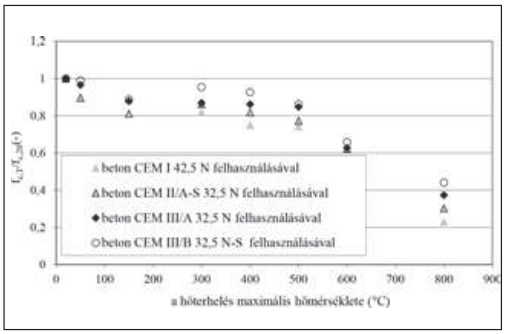


6. ábra: CEM III/A 32,5 N jelű cementtel készült beton repedésképe a 800°C-os hőterhelést követe

hőmérsékletének függvényében *7. ábrán* adtuk meg, amelyből a következő megállapításokat tettük:

- A hőterhelés hatására a beton maradó nyomószilárdsága 150 °C-os hőterhelésig csökken, majd 300 °C körül egy átmeneti szilárdság-növekedést figyelhetünk meg. 300°C-nál magasabb hőterhelés esetén a maradó nyomószilárdság újból csökken.
- A CEM II/A-S 42,5 N, CEM III/A 32,5 N és CEM III/B 32,5 N-S típusú cementből készült kohósalak tartalmú beton *relatív, maradó nyomószilárdsága* a hőterhelés hatására nagyobb, mint CEM I 42,5 N cementtel (tiszta portlandcement) készült betoné.
- A cement kohósalak tartalmának növekedésével a beton hőterhelés utáni relatív, maradó nyomószilárdsága nő.
- A 800 °C-os hőterhelés után a CEM I 52,5 N-es portlandcementből készült beton maradó relatív nyomószilárdsága 23%, a CEM III/B 32,5 N-S-es kohósalak cementből készült beton *relatív, maradó nyomószilárdsága* 44% volt, azaz a kohósalak cement tartalmú beton esetén kétszerese a portlandcement betonénak.

7. ábra: A beton relatív, maradó nyomószilárdsága a cementtípus és a hőterhelés maximális hőmérséklete függvényében (28 napos korú próbatestek, minden pont 3 mérési eredmény átlagának felel meg)



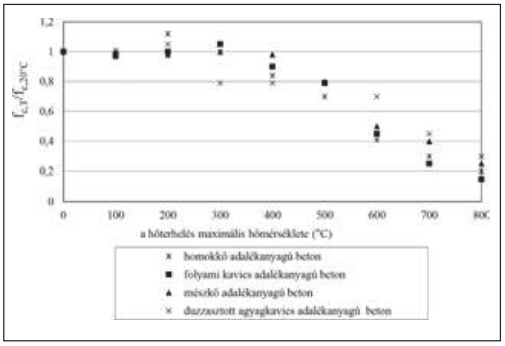
3.2 A beton szilárdsági értékeinek alakulása hőterhelés után az adalékanyag típusától függően

A beton szilárdsági jellemzőinek magas hőmérséklet hatására bekövetkező változását az adalékanyag típusa is meghatározza (Schneider, 1986; Khoury et al, 2001). Schneider (1986) szerint minden adalékanyag típushoz jellegzetesen más viselkedés tartozik.

A *nyomószilárdság* vizsgálatát ebben a kísérletsorozatban szobahőmérsékletre visszahűlt állapotban végezték, mivel a melegen vizsgált próbatestek maradó nyomószilárdsága nagyobb, mint a szobahőmérsékleten vizsgáltaké (Schneider, 1986). A nyomószilárdság - hőmérséklet összefüggés diagramján *(8. ábra)* 200 °C-ig nem olvasható le egyértelmű tendencia. A kvarc és a mészkő adalékanyagú betonok esetén csekély a hőmérséklet növekedésével kezdeti szilárdságcsökkenést figyelhetünk meg, amit átmeneti szilárdságnövekedés követ. Az átmeneti szilárdságcsökkenésre magyarázatot nyújthat a cementkő és az adalékanyag különböző hőtágulási együtthatója (Hinrichsmeyer, 1987). A cementkő és az adalékanyag hőtágulása miatt az adalékanyag szemcsék és a cementkő határfelületén mikrorepedések keletkeznek. A hőmérséklet emelkedése során az adalékanyag növekvő hőtágulása miatt a repedéstágasság csökken.

400 °C-ig a nyomószilárdság értékei csökkenő tendenciát mutatnak, a fellépő szilárdságcsökkenést a cement repedezésével magyarázhatjuk. 400 °C felett a különböző adalékanyagú betonok szilárdsági értékeinek alakulását külön kell tárgyalni, mivel lényegesen eltérő tendenciát mutatnak. A kvarckavics adalékanyagú betonok szilárdságcsökkenése 550 °Cig megközelítőleg 40%, a duzzasztott agyagkavics esetén ez a szilárdságcsökkenés jóval kisebb, mintegy 20%. A szilárdságcsökkenést 450-550 °C között a portlandit bomlása, valamint az adalékanyag és a cementkő eltérő hőtágulása okozza.

700 °C fölött az adalékanyagtól függetlenül minden beton esetén további jelentős szilárdságcsökkenést figyelhetünk meg, amit a CSH (kálcium szilikát hidrát) vegyületek átalakulása okoz.



8. ábra: A beton relatív, maradó nyomószilárdságának változása magas hőmérsékleten az adalékanyag típusától függően (Schneider, 1986)

3.3 A beton szilárdsági értékeinek alakulása a víz-cement tényezőtől és az adalékanyag-cement tényezőtől függően

A beton magas hőmérsékleten bekövetkező, illetve hőterhelés utáni viselkedését nem csak alkotóelemei, hanem azok mennyiségi aránya is jelentősen befolyásolják.

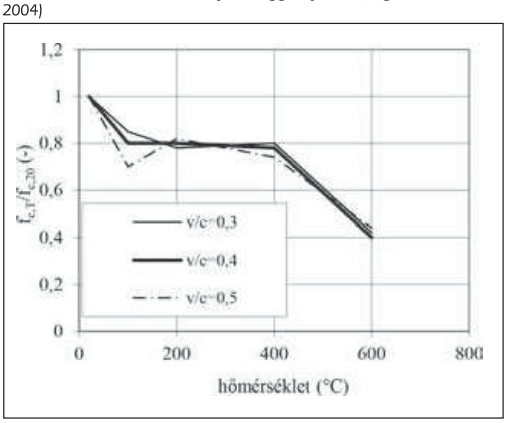
Az *adalékanyag-cement tényező hatása* 400 °C-ig *nem jelentős, viszont minél nagyobb a beton cementtartalma, annál jelentősebb mértékben csökken* 400°C felett a maradó nyomószilárdság (Schneider, Lebeda 2000).

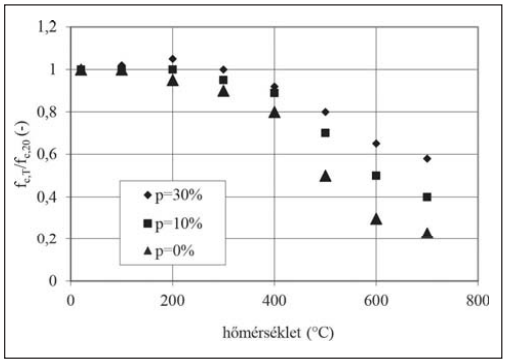
A *víz-cement tényező* jelentős hatással van a **beton nyomószilárdságának** magas hőmérsékleten való alakulására *(9. ábra)*. Megfigyelhető, hogy minél nagyobb a víz-cement tényező, annál kedvezőtlenebb viselkedést figyelhetünk mintegy 100°C-ig. Ezt a szabad víz távozásával magyarázhatjuk.

3.4 A beton szilárdsági értékeinek alakulása a hőterhelés módjától függően

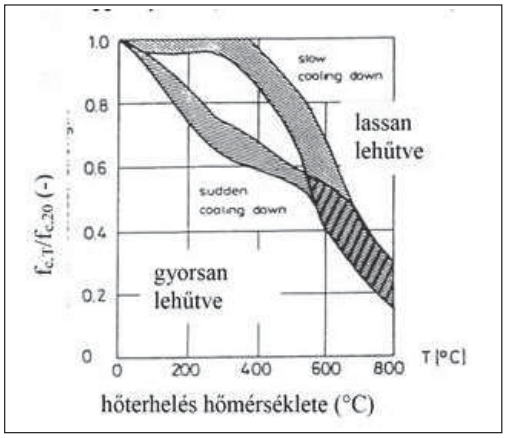
Lényeges és kedvező változás következik be, ha a beton a felmelegedés során terhelésnek is ki van téve. A beton szilárdsági értékei ebben az esetben az alacsonyabb

9. ábra: A beton relatív maradó nyomószilárdságának változása magas hőmérsékleten a vízcement tényező függvényében (Hager, Pimienta, 2004)





10. ábra: A beton nyomószilárdságának változása a hőmérséklet és az előteher nagyságának függvényében (Schneider, Lebeda, 2000)



11. ábra: A betonszilárdságának alakulása hőterhelés után a leh□tés módjától függően (CEB Bulletin 208, 1991)

hőmérsékleti tartományokban (50 °C - 200 °C) nem csökkenek, sőt növekedhetnek. A **beton nyomószilárdságának** változása a terhelés és a hőmérséklet függvényében a *10. ábrán* látható. A *9. ábrán* látható esetben a próbatesteket a melegítés során a töréshez tartozó erő 0, 10 és 30%-kal terhelték (p=0%, p=10%, p=30% hőterhelés előtti előteherhen kívül) előkísérletként. A hőterhelés után törésig terhelték. Jól látható, hogy minél nagyobb előterhet adtak a próbatestekre a hőterhelés során, annál kisebb volt a szilárdságcsökkenés mértéke (Schneider, Lebeda, 2000).

A melegen vizsgált próbatestek szilárdsága nagyobb, mint a lehűlt állapotban vizsgáltaké, amit a lehűlés során a betonban keletkező repedésekkel és feszültségekkel magyarázhatunk (Schneider, 1986). A lehűlés során a lehűlés sebessége sem közömbös a maradó nyomószilárdság szempontjából (*11. ábra*), gyorsabb lehűlés vagy lehűtés esetén a szilárdságcsökkenés mértéke nagyobb. Fehérvári (2009) kutatási eredményei a hűtési sebességből adódó különbséget kisebbnek mutatták.

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A tűz, illetve a magas hőmérséklet az építőanyagokra mindenképpen extrém terhelést jelent. Jelen cikk keretein belül a beton anyagszerkezeti, illetve szilárdsági jellemzőinek tűz hatására bekövetkező változását ismertettük. A cikk célja,

hogy a mérnökök számára érthetővé tegye, hogy milyen anyagszerkezeti változások következnek a betonban a tűz, illetve a magas hőmérséklet hatására, és ennek milyen hatása van a vasbetonszerkezetek tűz alatti viselkedésére.

A hőmérséklet emelkedésével a beton szilárdsági jellemzői romlanak. A beton a lehűlés során sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, és végezetül tönkremegy. Az összegződő alakváltozások mértéke olyan nagy lehet, hogy a közvetlenül tűztehernek ki nem tett szerkezeti elemek is károsodhatnak.

A vasbeton szerkezetek tönkremenetele alapvetően a következő két okra vezethető vissza (Balázs, Lublóy, 2009):
- a beton alkotóelemeinek kémiai és fizikai átalakulására,
- a betonfelület réteges leválására.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ (Thielen, 1994):
- a cement típusától,
- az adalékanyag típusától,
- a víz-cement tényezőtől,
- az adalékanyag-cement tényezőtől,
- a beton kezdeti nedvességtartalmától,
- a hőterhelés módjától.

A szilárdsági tulajdonságok romlása mellett a betonfelület réteges leválása is bekövetkezhet, ami a statikai rendszer átalakulását eredményezheti. A betonfelület réteges leválásának veszélyét a megfelelő szerkezeti kialakítással és a megfelelő anyagválasztással lényegesen csökkenthetjük. Itt megjegyezzük, hogy az Eurocode-ban megadott méretezési eljárások nem használhatóak, ha a betonfelület réteges leválása bekövetkezik.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az **NVKP_16-1-0019** "Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

6. HIVATKOZÁSOK

Balázs L. Gy., Lublóy É. (2009), "Magas hőmérséklet hatása a vasbeton szerkezetek anyagaira", VASBETONÉPÍTÉS 2009/2, pp. 48-54.

CEB Bulletin D'Information Nr 208: Fire design of concrete stuctures:. 1991 Lausanne

Chen, G. M., He, Y. H., Yang, H., Chen, J. F., Guo Y. C. (2014), „Comp-ressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures", *Constr. Build. Mater*., 71, pp. 1–15. 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.012

Dorn, T. (1993), „Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Trager-Stützen Anschlüsse". Heft 99, Braunschweig

Fehérvári, S. (2009): „Beton összetevők hatása az alagútfalazatok hőtűrésére", Doktori értekezés, BME

fib bulletin 38, (2007): „Fire design of concrete structures- materials, structures and modelling", Lausanne, ISBN: 978-2-88394-078-9

Hager, I., Pimienta, P. (2004): „Mechanical properties of HPC at high temperatures", *Proceedings* for Fire Design of Concrete Structures: What now?, What next?, edited by: P.G., Gambarova, R., Felicetti, A., Meda, P., Riva, December 2-3, 2004

Hinrichsmeyer, K. (1987): Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig

Høj, N., P. (2005): Fire Desin of Concrete Stuctures, Proceedings of ***fib*** Symposium on Keep Concrete Attractive, (edited by Balázs, G.L., Borosnyói, A.) 23-25 May 2005 Budapest, pp.: 1097-1105.

Horiguchi, T. (2005), "Combination of Synthetic and Steel Fibres Reinforcement for Fire Resistance of High Strength Concrete", *Proceedings* of Central European Congress on Concrete Engineering (CCC2015), 8-9 Sept. 2005 (Ed.: Pauser, M.), Graz, pp. 59-64.

Kordina, K (1997), „Über das Brandverhalten punktgestützter Stahbetonbalkaen", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, Beuth Verlag GmbH, Berlin, ISSN 0171-7197

Khoury, G. A., et al. (2001), "Fire Design of Concrete Materials structures and modelling", *Proceeding* of the 1st ***fib*** Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001

Mörth, W., Haberland Ch., Horvath J., Mayer A. (2005), „Behaviour of Optimized Tunnel Concrete with Special Aggregates at High Temperature", *Proceedings* of Central European Congress on Concrete Engineering (CCC2015) 8.-9. Sept. 2005, Graz, pp. 41-50.

Schneider, U. (1986), „Properties of Materials at High Temperatures of Concrete", *RILEM Publ*., 2nd Edition, Gesamthochschule Kassel, Universität Kassel

Schneider, U., Lebeda, C. (2005), „Baulicher Brandschutz" W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart, ISBN 3-17-015266-1

Walter, R., Kari H., Kutserle W., Lindlbauer W. (2005), „Analysis of the Load-bearing Capacity of Fibre Reinforced Concrete During Fire", *Proceedings* of Central European Congress on Concrete Engineering (CCC2015), 8.-9. Sept. 2005 Graz, pp. 54-59.

Dr. Balázs L. György (1958) okl. építőmérnök, mérnöki matematikai szakmérnök PhD, Dr. habil., egyetemi tanár, a a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék vezetője. MTA műszaki tud. kandidátusa. Fő kutatási területei: beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), roncsolásmentes vizsgálatok. Speciális betonok és betétek: szálerősítésű betonok (FRC), nem acélanyagú (FRP) betétek, megerősítések anyagai és módjai, HPC, UHPC, LWC. Tűzállóságra való tervezés, tűzállóság fokozása. Fagyállóság fokozása. Kémiai ellenállóképesség fokozása. Tartósság. Használati élettartam. Fenntartható építés. Erőátadódás betonban, vasbeton tartók repedezettségi állapota. Fáradás. Lökés szerű terhelés. Nukleáris létesétmények. A ***fib*** (Nemzetközi Betonszövetség) elnöke (2011-2012), jelenleg tiszteletbeli elnöke. A ***fib*** Magyar Tagozat elnöke. Az Int. PhD Symp. in Civil Engineering alapítója. A ***fib*** Com 9 „Dissemination of knowledge" elnöke.

Dr. Lublóy Éva (1976) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2001), dovens a BME Építőanyagok és Magsépítés Tanszékén (2008). Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A ***fib*** Magyar Tagozat tagja.

Dr. Kopecskó Katalin, okl. vegyészmérnök (BME, Vegyészmérnöki Kar, 1990), okl. betontechnológus szakmérnök (2004), PhD (2006), egyetemi docens a BME Geotechnika és Mérnölgeológia Tanszékén. Fő érdeklődési területei: építőanyagok tartóssága, anyagvizsgálat és fázisátalakulások elemzése röntgendiffrakcióval és termoanalitikával. A ***fib*** Magyar Tagozat, valamint az MSZT/MB 102 "Cement és mész» Nemzeti szabványosító műszaki bizottság tagja.

Dr. Nehme Salem Georges (1963) okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a beton porozitása, a betonok és öntömörödő betonok tartósságának összefüggése a porozitással, az öntömörödő betonok és acélszálas öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében, az öntömörödő betonok tömegbetonként történő alkalmazási problémainak megszüntetése. A Magyar Mérnöki Kamara (T1-01-9159), a fib Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

Dr. Nemes Rita (1978) okl. építőmérnök, betontechnológiai szakmérnök, PhD, egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési területei: roncsolásmentes betonvizsgálatok, hulladék alapú adalékanyagok és kiegészítő anyagok alklamazása betonban, betonacél tapadás speciális betonokban, könnyűbetonok, tartósság. A ***fib*** Magyar Tagozatának és a Szilikáipari Tudományos Egyesületnek tagja.

Dr. Kausay Tibor (1934) okl. építőmérnök (1961), vasbetonépítési szakmérnök (1967), egyetemi doktor (1969), a műszaki tudomány kandidátusa (1978), Ph.D. (1997), címzetes egyetemi docens (1985), címzetes egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszéken (2003), a ***fib*** Magyar Tagozat tagja (2000), az MTA gróf Lónyay Menyhért emlékérmese (2003), a Palotás László-díj birtokosa (2015). Tevékenysége a betontechnológiai és a kő- és kavicsipari kutatásra, fejlesztésre, szakértésre, oktatásra, szabványosításra terjed ki. Publikációinak száma mintegy 220.3

Dr. Józsa **Zsuzsanna** (1950) PhD, címzetes egyetemi tanár a BME-n, építészmérnök, épületrekonstrukciós szakmérnök. Főbb kutatási területei: könnyűbeton, építőanyagok tönkremenetele és védelme, szerkezetek hő- és nedvességtechnikai jellemzői, környezetkímélő építés anyagai.

Hlavička Viktor (1987) okl. szerkezet-építőmérnök (MSc), betontechnológus, tűvédelmi tervezési szakmérnök, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék doktorjelöltje. Fő érdeklődési területei: rögzítéstechnika, mechanikus és ragasztott csapok betonokban való viselkedése és végeselemes modellezése, tűzkárosult szerkezetek és szerkezeti anyagok mérnöki tanulságai. A ***fib*** Magyar Tagozat tagja.

Kakasy Gergely László (1979) okl. építészmérnök (SZIE-YMMF, 2006), okl. tűzvédelmi tervező szakmérnök (BME, 2015), az ÉMI Nonprofit Kft. Tűzvédelmi Vizsgálati Egység vezetője. Fő szakterületei: tűzállósági határérték és homlokzati tűzterjedési határérték vizsgálatok.

Tóth Péter László (1971) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 1995), az ÉMI Nonprofit Kft. mb. műszaki igazgatója. Fő érdeklődési területek: Épületfizika és épületszerkezetek, homlokzati tűzterjedés. A CIB vezetőségi tagja.

Nyíri Szabolcs (1977) okl. építőmérnök, a MAÚT (Magyar Út- és Vasútügyi Társaság) elnöke, építőanyag ipari szakértő. Szakterületei: anyagok ls termékek vizsgálatai, minősítése és projektek minőségbiztosítása.

Lizakovszky Géza SW Umwelttechnik Magyarország Építőelemgyár Kft. minőségirányítási igazgató 2003-ban végzett a Miskolci Egyetem gépészmérnöki karán, majd 2008-ban szerzett mérnök-közgazdász diplomát. 2004-től áll az SW Umwelttechnik Magyarország Kft-nél, illetve jogelődjeinél alkalmazásban. 2015 végén, elődje visszavonulását követően a menedzsment megbízza a cég minőségirányítási igazgató feladatainak ellátásával. Közvetlenül két labor, 3 gyáregység minőségi- és környezetvédelmi és fejlesztési kérdési tartoznak hozzá, közvetetten pedig több mint 200 saját munkatárson, valamint alvállalkozókon keresztül Magyarország egyik piacvezető beton építőelemgyártó cég termékeinek megfelelőségért felelős.

Molnár Tamás (1987), okl. építészmérnök (BME) 2011, okl. betontechnológus szakmérnök (BME) 2014. SW Umwelttechnik Magyarország Kft. fejlesztési - és technológiai vezetője, betontechnológus.

Czirják János (1975) okl nyersanyagelőkészítő mérnök (Miskolci Egyetem, Bányamérnöki Kar, 1999), okl. betontechnológus szakmérnök (BME, 2011), a CRH Magyarország Kft Műszaki Szolgáltató Központ vezetője, betontechnológus.

Földes Tamás (1954) okl. geológus (ELTE 1979), 2005-ig a Kőolajkutató vállalatnál, majd pedig a MOL Rt-nél dolgozott. 2006-tól a Kaposvári Egyetem Diagnosztikai Intézetének munkatársa. 1999-töl végez CT és MR mérési értékeléseket élettelen vizsgálati anyagokon, elsősorban kőzeteken. Fő érdeklődési területe: szénhidrogén rezervoár, geológiai modellezés, nagyfelbontású képalkotó roncsolásmentes mérések (CT, microCT, MR), élettelen anyagvizsgálati módszerek kiértékelése. A Magyarhoni Földtani Társulat, a Geofizikai Társulat és az EAGE tagja.

Nabil Abdelmelek (1992), PhD student at the Department of Construction Materials and Technologies, Budapest University of Technology and Economics. His main fields of research interest are: fire design and behaviour of concrete at elevated temperature.

Mohammed Abed (1991) civil engineer (MSc). PhD candidate at the Department of Construction Materials and Technologies, Budapest University of Technology and Economics. Main fields of interests: recycled concrete aggregate, non-destructive testing of concert, high performance concrete, supplementary cementations materials.

Naser Alimrani (1989), PhD student at the Department of Construction Materials and Technologies, Budapest University of Technology and Economics. His main fields of research interest are: fire design and behaviour of concrete at elevated temperature.

EFFECT OF FIRE ON CONCRETE STRUCTURES – STATE OF THE ART REPORT

György L. Balázs – Éva Lublóy – Katalin Kopecskó - Salem G. Nehme – Rita Nemes – Tibor Kausay – Zsuzsanna Józsa – Viktor Hlavička – Gergely Kakasy - Péter Tóth – Szabolcs Nyíri – Géza Lizakovszky – Tamás Molnár – János Czirják – Tamás Földes – Nabil Abdelmelek – Mohamed Abed – Naser Alimrani

Recent fire cases indicated again the importance of fire research. Fast development of construction technology requires new materials. Initiation and development of fire are strongly influenced by the choice of construction materials, as well as the constituents of them. In addition to their mechanical properties, their behaviour at elevated temperature is also of high importance. Residual compressive strength of concrete exposed to high temperatures is influenced by the following parameters: water to cement ratio, cement to aggregate ratio, type of aggregate, water content of concrete before exposing it to high temperatures and the fire process. Therefore, mix design and composition of concrete is of high importance for high temperatures.

IMPROVED FIRE RESISTANCE BY USING DIFFERENT DOSAGES OF METAKAOLIN

Abdelmelek Nabil[1], Éva Lublóy[2]
[1] nabil3c@gmail.com
[2] Corresponding author; lubloy.eva@epito.bme.hu
Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest, Hungary)

12th Central European Congress on Concrete Engineering 2017 Tokaj • TAILORED PROPERTIES OF CONCRETE

SUMMARY

Concrete is a composite material that consists mainly of mineral aggregates bound by a matrix of hardened cement paste. Strength reduction of high strength concrete during and after fire may be different from that of normal strength concrete. The use of metakaolin as a recent material in the construction industry proves to be very useful to modify the properties of concrete. An extensive experimental study was carried out to analyses the post-heating characteristics of hardened cement paste subjected to temperatures up to 800 °C. Major parameters of our study were the content (0, 3, 6, 9 or 12 m%) of one type supplementary material (metakaolin) as a replacement of cement, as well as the value of maximum temperature of exposure (50, 150, 300, 400, 500, 800 and 900°C). In the experiments specimens were exposed to the given maximal temperatures and then cooled down to room temperature. Present studies included analysis of compressive strength.

1. INTRODUCTION

Concrete can be exposed to elevated temperatures during fire or when it is applied by furnaces and reactors. The behaviour of a concrete structural members exposed to fire is dependent on physical, thermal, and mechanical deformation properties of concrete of which the member is composed. The deterioration processes influence the durability of concrete structures and may result in undesirable structural failures. Therefore, preventative measures such as choosing the right materials should be taken to minimize the harmful effects of high temperature on concrete. The high temperature behaviour of concrete is greatly affected by material properties, such as the properties of the aggregate, the cement paste, and the bond between the aggregate and cement paste, as well as the thermal compatibility of the aggregate and cement paste.

2. BEHAVIOUR OF CONCRETE IN FIRE

2.1 Physical behaviour

It is generally agreed (Short, Purkiss and Guise, 2001; Colombo and Felicetti, 2007) that concrete containing siliceous aggregates when heated between 300 °C and 600 °C it will turn red; between 600 °C and 900 °C, whitish-grey; and between 900 °C and 1000 °C, a buff colour is present. The colour change of heated concrete results from the gradual water removal, dehydration of the cement paste, and transformations occurring within the aggregate, respectively. The most intense colour change, the appearance of red colouration, is observed for siliceous riverbed aggregates containing iron. This colouration is caused by the oxidation of mineral components. While siliceous aggregates turn red when heated, the aggregates

containing calcium carbonate get whitish. Due to calcination process $CaCO_3$ turns to lime and give pale shades of white and grey (Hager, 2013a).

2.2 Thermal behaviour

Thermal properties that govern temperature dependent properties in concrete structures are thermal conductivity, specific heat (or heat capacity) and mass loss (Kodur, 2014). The density of concrete shows only slight temperature dependence, which is mostly due to moisture losses during heating. However limestone concretes show a significant decrease of density at about 800 °C due to the decomposition of the calcareous aggregate. The thermal conductivity of concrete depends on the conductivities of its constituents. The major factors are the moisture content, the type of aggregate and the mix proportions. The conductivity of any given concrete varies approximately linearly with the moisture content (Schneider, 1988).

2.3 Mechanical behaviour

The mechanical properties that are of primary interest in fire resistance design are compressive strength, tensile strength, elastic modulus and stress-strain response in compression (Kodur, 2014). The mechanical response of concrete is usually expressed in the form of stress-strain relations, which are often used as input data in mathematical models for evaluating the fire resistance of concrete structural members (Hager, 2013b).

Generally, because of a decrease in compressive strength and increase in ductility of concrete, the slope of stress-strain curve decreases with increasing temperature. The strength of concrete has a significant influence on stress-strain response both at room and elevated temperatures.

3. METAKAOLIN

Metakaolin (MK) is a recent addition in the list of pozzolanic materials. It is a thermally activated alumino- silicate produced from kaolinite clay through a calcining process. Unlike other pozzolans, MK is a primary product, not a secondary product or by-product. This allows the manufacturing process to be structured to produce the optimum characteristics for the MK, ensuring the production of a consistent product and a consistent supply. The white color of MK results in a concrete with lighter color, another advantage making it popular (Mlinárik and Kopecskó, 2013; Kopecskó and Mlinárik, 2014).

MK enhances the strength and durability of concrete through three primary actions which are the filler effect, the acceleration of ordinary Portland cement (OPC) hydration and the pozzolanic reaction with calcium hydroxide (CH). Wild, Khatib and Jones (1996) found that the filler effect is immediate, the acceleration of OPC hydration has its major impact within the first 24 h and the maximum effect of pozzolanic reaction occurs between 7 and 14 days. It was concluded that the optimum replacement level of OPC by MK to give maximum long term strength is about 20% by weight.

Kostuch, Walter and Jones (2000) discovered that a 10% replacement of cement with MK reduced the CH content in concrete by 70%, and a 20% replacement reduced it to almost zero after 28 days. However, the amount of MK required for complete elimination of CH depends on a number of factors such as purity of MK, Portland cement composition, water/binder ratio and curing conditions (Oriel and Pera, 1995). The reduction in CH content results in superior

strength and durability performance, even at elevated temperatures (Lin, Lin and Powers-Couche, 1996). Poon, Kou and Lam (2000) prepared normal and high strength concrete (HSC) mixes incorporating 5%, 10% and 20% MK and compared their performance with the equivalent silica fume (SF) and fly ash (FA) mixes. They observed that the MK concrete possessed higher strength, lower permeability and less porosity as compared to the corresponding SF and FA concretes. In another study in the case of the mortar samples prepared with 10 or 17 m% MK, the smaller substitution (10 m%) was found more effective, than the higher substitution of the cement (17 m%). The compressive strength of the samples with 17 m% substitution is very similar to that of the reference samples (specimens made without metakaolin addition). The higher dosage of MK is expectedly resulted in the aggregation of the particles, which could not completely disperse during mixing. The results of the samples made with SF were the opposite; the higher substitution ratio (10 m%) was found to be more effective than the smaller substitution ratio (5 m%) (Mlinárik, Kopecskó and Borosnyói, 2016).

It was observed that the fire resistance of concrete is highly dependent on its constituent materials, particularly the pozzolans. A number of research studies (Phan, 1996) indicated that the addition of pozzolanic SCM highly densifies the pore structure of concrete, which can result in explosive spalling due to the build-up of pore pressure by steam. Since the evaporation of physically absorbed water starts at 80 °C which induces thermal cracks, such concretes may show inferior performance as compared to pure OPC concretes at elevated temperatures.

4. EXPERIMENTAL DETAILS

An experimental program was designed to analyse the post-heating characteristics of hardened cement paste subjected to temperatures up to 800 °C. Major parameters of our study were the different dosages (0, 3, 6, 9, 12 or 15 m%) of supplementary material (metakaolin) of the binder (as replacement of cement) and the value of maximum temperature (50, 150, 300, 400, 500, 800 °C). In the experiments specimens were exposed to the given maximal temperatures and then cooled down to room temperature. Tests were carried out at room temperature. Present studies included analysis of compressive strength.

4.1. Materials

Preparing the specimens OPC (CEM I 42,5 N) and metakaolin supplementary material was used. The water cement-ratio was 0.35. 2 g/kg liquid superplasticizer was applied. Cubic form cement paste specimens were cast with the size of 30 mm.

4.2. Curing and heating regimes

The specimens were demolded 24 h after the casting and placed in a water tank at 20 °C. After 7days of water curing, they were transferred to an environmental chamber maintained at 20 °C and normal humidity. At an age of 90 days, the specimens were heated in a furnace (20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 and 900 °C). Our experimentally applied heating curve was similar to the standard fire curve up to 800 °C. Specimens were kept for two hours at the actual maximum temperature levels. Specimens were then slowly cooled down in laboratory conditions for further observations. During the heat load a program controlled electric furnace was used. The compressive strength was measured on the heat loaded and, than

cooled down specimens and the average values of the measurements were analysed. The specimens were allowed to cool naturally to room temperature, and tested.

5. RESULTS AND DISCUSSIONS

The development of compressive strength as a function of temperature is presented in Fig. 1.

Residual compressive strength of cement stone specimens is shown in Fig. 2 relating to the concrete composition and the maximum temperature of thermal load, from which the following conclusions can be drawn: the relative residual compressive strength decreases up to 150 °C heat loading, then increases up to 300 °C. In the case of higher temperatures than 300 °C the residual relative compressive strength decreases again. Specimens loaded up to 300 °C show higher residual strength comparing with the average strengths measured on specimens loaded up to 150 °C because the intensive dehydration in the temperature interval between 60 and 180 °C probably causes the hydration of the unhydrated cement grains in the microstructure. To sum up these results, the temperature load at 900 °C caused increasing residual relative compressive strength with the increase of content of supplementary materials.

In case of cement stone prepared with metakaolin containing binder (to 12 m% related to the mass of cement) the strength increased due to the temperature load of 800 °C. Addition of metakaolin was found to be unfavourable for fire resistance of concrete at the age of test (thermal load was applied at the age of 90 days).

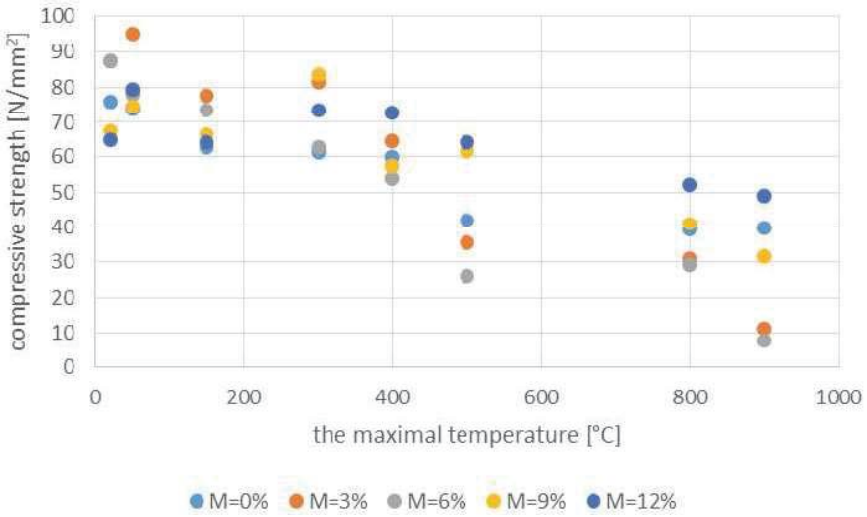


Fig. 1: The compressive strength for the different mixes as a function of maximum temperature (averages of 5 measurements)

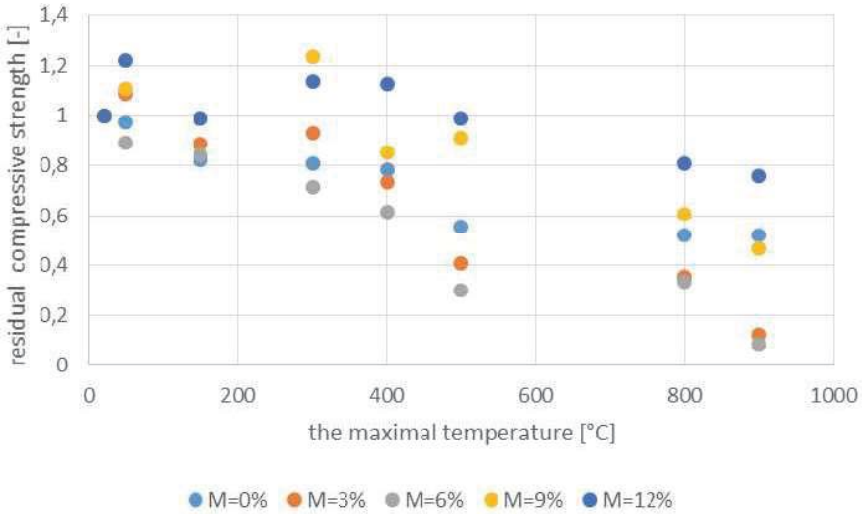


Fig. 2: Relative residual compressive strength for the different mixes as a function of maximum temperature (averages of 5 measurements)

6. CONCLUSIONS

Concrete is a composite material that consists mainly of mineral aggregates bound by a matrix of hardened cement paste. Strength reduction of high strength concrete during and after fire may be different from that of normal strength concrete. The use of metakaolin as a recent material in the construction industry proves to be very useful to modify the properties of concrete. An extensive experimental study was carried out to analyses the post-heating characteristics of hardened cement paste subjected to temperatures up to 800 °C. Major parameters of our study were the content (0, 3, 6, 9 or 12 m%) of supplementary material (metakaolin) of cement and the value of maximum temperature (50, 150, 300, 400, 500, 800 and 900°C). In the experiments specimens were exposed to the given maximal temperatures and then cooled down to room temperature.

The relative residual compressive strength decreases up to 150 °C heat loading, then increases up to 300 °C. In the case of higher temperatures than 300 °C the residual relative compressive strength decreases again. Specimens loaded up to 300 °C show higher residual strength comparing with the average strengths measured on specimens loaded up to 150 °C because the intensive dehydration in the temperature interval between 60 and 180 °C probably causes the hydration of the unhydrated cement grains in the microstructure. To sum up these results, the temperature load at 900 °C caused increasing residual relative compressive strength with the increase of content of supplementary materials.

In case of cement stone prepared with metakaolin containing binder (to 12 m% related to the mass of cement) the strength increased due to the temperature load of 800 °C. Addition of metakaolin was found to be unfavourable for fire resistance of concrete at early ages (thermal load was applied at the age of 28 days). This could be explained by the different rate of pozzolanic reaction of the SCMs.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw". Second author acknowledges the support by the János Bolyai Resarch Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences.

8. REFERENCES

Colombo, M., Felicetti, R. (2007), "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures", Fire Safety Journal 42 (6–7), pp. 461-472

Hager, I. (2013a), "Colour change in heated concrete", Fire Technology, 50, pp. 945–958.

Hager, I. (2013b), "Behaviour of cement concrete at high temperature". The Journal of Polish Academy of Sciences. Vol 61, Issue 1, Mar 2013. Poland

Kodur, V.R. (2014), "Properties of Concrete at Elevated Temperatures", Civil Engineering Volume Hindawi Publishing Corporation ISRN, Article ID 468510, 15 p.

Kostuch J.A., Walter G.V., Jones T.R. (2000), "High performance concretes containing metakaolin – A review" In: Proceedings of the International Conference – Concrete 2000, Dundee, vol. 2. 2000. pp. 1799–811.

Kopecskó, K., Mlinárik, L. (2014), "Metakaolin a betonban (in English: Metakaolin in concrete)", BETON XXII.:(3-4.) pp. 18-21.

Lin W.M., Lin T.D., Powers-Couche L.J. (1996), "Microstructures of firedamaged concrete" ACI Mater J 93 (3), pp. 199–205.

Mlinárik, L., Kopecskó, K. (2013), "Impact of metakaolin - a new supplementary material - on the hydration mechanism of cements", Acta Technica Napocensis - Civil Engineering & Architecture 56 (2) pp. 100-110.

Mlinárik, L., Kopecskó, K., Borosnyói, A. (2016), "Properties of cement mortars in fresh and hardened condition influenced by combined application of SCM, "Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, Vol. 68, No. 2 (2016), pp. 62–66. http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.11

Oriel M., Pera J. (1995), "Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment", Cem Concr Res 25 (2), pp. 265–70.

Phan L.T. (1996), "Fire performance of high strength concrete: A report of the state-of-the art" Maryland: Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology

Poon C.S, Kou S.C, Lam L. (2000), "Compressive strength development, chloride-ions resistance and pore size distribution of metakaolin concrete", The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

Schneider., U. (1988), "Concrete at high temperatures - a general review," Fire Safety Journal, vol. 13, no. 1.

Short, N.R., Purkiss, J.A., Guise, S.E. (2001), "Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis", Constr. Buil. Mater. 15, pp. 9-15

Wild S., Khatib J.M., Jones A. (1996), "Relative strength pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete" Cem Concr Res 26 (10):1537 44.

FIRE BEHAVIOUR OF CONCRETE – INFLUENCING PARAMETERS

2017 • CONCRETE STRUCTURES






Naser Alimrani – Abdelmelek Nabil – György L. Balázs – Éva Lublóy

Concrete can be exposed to elevated temperatures during fire or when it is close to furnaces and reactors. The behaviour of a concrete structural member exposed to fire is dependent, in part, on physical, thermal, and mechanical deformation properties of concrete of which the member is composed. These deterioration processes influence the durability of concrete structures and may result in undesirable structural deterioration or even failure. In present paper we intended to give an overview of the different parameters and their influence on the behaviour of concrete at elevated temperatures or on fire.

Keywords: concrete, high temperature, fire, colour change, cement type, w/c, type of aggregate

1. INTRODUCTION

Concrete can be exposed to elevated temperatures during fire or when it is close to furnaces and reactors. The behaviour of a concrete structural members exposed to fire is dependent, on physical, thermal, and mechanical deformation properties of concrete of which the member is composed. The deterioration processes influence the durability of concrete structures and may result in undesirable structural failures. Therefore, preventative measures such as choosing the right materials should be taken to minimize the harmful effects of high temperature on concrete. The high temperature behaviour of concrete is greatly affected by material properties, such as the properties of the aggregate, the cement paste and the aggregate-cement paste bond, as well as the thermal compatibility between the aggregate and cement paste.

2. BEHAVIOUR OF CONCRETE IN FIRE

2.1 Physical behaviour (colour changes)

It is generally agreed (Short et al., 2001; Colombo and Felicetti, 2007) that concrete containing siliceous aggregates when heated between 300 °C and 600 °C it will turn red; between 600 °C and 900 °C, whitish-grey; and between 900 °C and 1000 °C, a buff colour is present. The colour change of heated concrete results from the gradual water removal, dehydration of the cement paste and transformations occurring within the aggregate, respectively. The most intense colour change, the appearance of red colouration, is observed for siliceous riverbed aggregates containing iron. This colouration is caused by the oxidation of mineral components. While siliceous aggregates turn red when heated, the aggregates containing calcium carbonate get whitish. Due to calcination process $CaCO_3$ turns to lime and give pale shades of white and grey (*Fig. 1*) (Hager, 2013b).

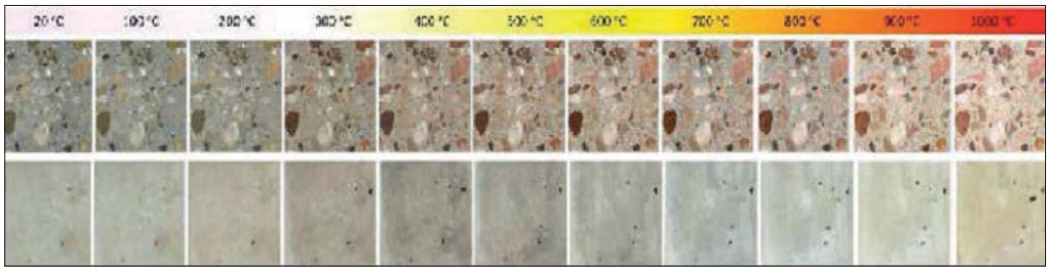
In general two approaches can be adopted when the colour change of concrete is analysed (Hager, 2013b). First, the external surface of the element can be examined. This involves the observation of an element's outer walls (in particular, the cement paste). The other possibility is to observe the surface with visible aggregates (sample cored or sawn out from the element) (Short et al., 2001; Colombo and Felicetti, 2007). When it is necessary to evaluate the condition of concrete after a fire, colour change is a physical property of concrete that can be used as an assessment method (Hager, 2013a).

2.2 Thermal behaviour

Thermal properties that govern temperature dependent properties in concrete structures are thermal conductivity, specific heat (or heat capacity) and mass loss (Kodur, 2014).

The density of concrete shows only slight temperature

Fig. 1: Colour change of heated concrete (Hager, 2013a)



dependence, which is mostly due to moisture losses during heating. However limestone concretes show a significant decrease of density at about 800 °C due to the decomposition of the calcareous aggregate. The thermal conductivity of concrete depends on the conductivities of its constituents. The major factors are the moisture content, the type of aggregate and the mix proportions. The conductivity of any given concrete varies approximately linearly with the moisture content (Schneider, 1988).

2.3 Mechanical behaviour

The mechanical properties that are of primary interest in fire resistance design are compressive strength, tensile strength, elastic modulus and stress-strain response in compression. Mechanical properties of concrete at elevated temperatures have been extensively studied in the literature in comparison to thermal properties (Kodur, 2014).

Fig. 2: Stress-strain relationship for normal concrete derived in strain-rate controlled tests (Schneider, 1988)

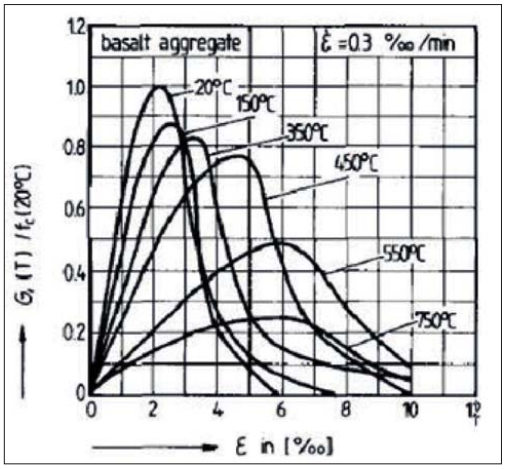


Table 1. The list of changes taking place in concrete during heating (Hager, 2013a)

Temperature range	Changes
20–200°C	slow capillary water loss and reduction in cohesive forces as water expands; 80–150°C ettringite dehydration; C-S-H gel dehydration; 150–170°C gypsum decomposition ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$); physically bound water loss;
300–400°C	approx. 350°C break up of some siliceous aggregates (flint); 374°C critical temperature of water;
400–500°C	460–540°C portlandite decomposition $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$;
500–600°C	573°C quartz phase change $\beta - \alpha$ in aggregates and sands;
600–800°C	second phase of the C-S-H decomposition, formation of β-C_2S;
800–1000°C	840°C dolomite decomposition; 930–960°C calcite decomposition $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$, carbon dioxide release; ceramic binding initiation which replaces hydraulic bonds;
1000–1200°C	1050°C basalt melting;
1300°C	total decomposition of concrete, melting.

Changes in mechanical properties that occur during heating are the result of changes taking place in concrete. Those material factors include physico-chemical changes in the cement paste and aggregates as well as the incompatibilities between them listed in *Table 1*. Other factors affecting the material damage level are as follows: heating rate, maximum temperature, time of exposure to temperature, load applied during heating, moisture content of the material, etc. (Hager, 2013a).

The mechanical response of concrete is usually expressed in the form of stress-strain relations, which are often used as input data in mathematical models for evaluating the fire resistance of concrete structural members (Hager, 2013a).

Generally, because of a decrease in compressive strength and increase in ductility of concrete, the slope of stress-strain curve decreases with increasing temperature. The strength of concrete has a significant influence on stress-strain response both at room and elevated temperatures (*Fig. 2*).

3. INFLUENCING PARAMETERS

3.1 Test methods

The test method has an important influence on the evaluation of the properties of heated concrete. The most common way to study the influence of high temperature on the properties of concrete is to expose the material to high temperatures, cool it down to room temperature, and then carry out the test, such as compression or tensile tests. However, this method gives the "post fire" or "post exposure to the high temperature" properties of concrete. Nevertheless, we have to consider that the most appropriate procedure to test the mechanical properties at high temperature is to determine the properties of material at elevated temperature (tested "hot") (Hager, 2013a).

It should be noticed that the selection of the type of test to be carried out should be determined in function of the real conditions that are intended to simulate. Thus, the tests carried out at high temperatures allow assessing the behaviour of concrete under fire conditions, while the tests after heating and cooling of the concrete allow knowing the residual behaviour after fire (Santos and Rodrigues, 2016).

3.2 Heating rate

While tests could be carried out under varying temperature ranges, the usual practice for clarity and simplification is to carry out tests either at constant temperature (e.g. 300 °C) or at constant rates of heating (e.g. at 2 °C/minutes). As for cooling, it could be natural or forced (*fib*, 2007).

Heating rates, for example 2 °C/min for mechanical properties, while too slow to simulate fire conditions are applied by scientists – and recommended by RILEM Committee – in order to separate as far as possible the material effects from structural effects of heating a specimen with the size of e.g. 6 cm in diameter and 18 cm in length (Khoury et al., 1984). In this respect fast heating will introduce thermal and moisture gradients and hence thermal stresses within the specimen. Smaller sizes in specimens (and in powder form) are generally exposed to higher heating rates because the size limits the structural effects. The limitation in heating rate has been shown to provide more accurate indication of the material behaviour for some material properties (*fib*, 2007).

3.3 Type of cement

The incorporation of pulverised fly ash (PFA) and slag in Portland cements or blended cements can generally keep the mechanical properties of concrete at a higher level after heating to high temperature. Compared to PC, the residual compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength and modulus of elasticity of PC blended with PFA increase by 1.2–270%, 1.1–80%, 4.5–200% and 3–38%, respectively, while the values for PC blended with slag are 1.5–510%, 1.2–43%, 1–180% and 1.3–117% higher, respectively. The values vary mainly with different temperatures, replacements and types of aggregates. In the research carried out by Wang (Wang, 2008) the bare PC paste had lost its compressive strength and modulus of elasticity completely at the temperature of 1050 °C. However, 18% of the compressive strength and 81% of the modulus of elasticity still remained for PC blended slag paste with the replacement rate of 80% at the same temperature. Furthermore, PCs blended with PFA and slag also exhibit a high resistance to spalling at high temperatures (Poon, Azhar, Anson, Wong, 2008; Heikal,-Didamony, Sokkary, Ahmed, 2013; Mendes, Sanjayan, Collins, 2008; Xu, Wong, Poon, Anson , 2003)

Karakurt and Topcu (Karakurt, Topcu, 2013) found by using SEM analysis that thermal cracking did not occur in PFA, and slag blending samples and that the degradation of C–S–H decreased compared to the reference samples made of Portland cement. Moreover, the incorporation of slag significantly reduces the amount of portlandite in PC. This way the extent of portlandite dehydration due to high temperature is decreasing. As a result of the above three aspects, the total porosity and the average pore diameter of PCs blended with PFA and slag are smaller than those of bare PC at high temperatures (Poon, Azhar, Anson, Wong, 2008). This could explain the higher resistance of PCs blended PFA and slag to high temperature.

Khoury et al. (Khoury et al., 2001) tested ordinary Portland cement (OPC) – PFA cement pastes containing 30% PFA by weight under a series of temperatures till 650 °C. The relative residual compressive strength was 88% at 450 °C and 73% at 600° C, which was almost double than the residual strength shown by pure OPC pastes. In a recent research, Yu et al. (Yu et. al, 2001) studied the effects of PFA replacement level, water/binder ratio (W/B), and curing conditions on the residual properties of concrete at elevated temperatures. An increase in strength was observed at 250 °C. All PFA concrete specimens showed better performance up to 650 °C than OPC concrete specimens; however, after that there was no significant difference in the residual strength of all specimens. It was found that a high dosage of PFA enhanced the residual properties of concrete at elevated temperatures. The results were also verified by porosity analysis done by mercury intrusion porosimetry (MIP) technique.

Nasser and Marzouk (1979) found that the PFA improved the performance of concrete at elevated temperatures as compared to silica fume or pure OPC concretes. However, this improvement was more significant at temperatures below 600 °C. Moreover, it was discovered that PFA also reduced the surface cracking of concrete both at elevated temperatures and after post cooling in air or water.

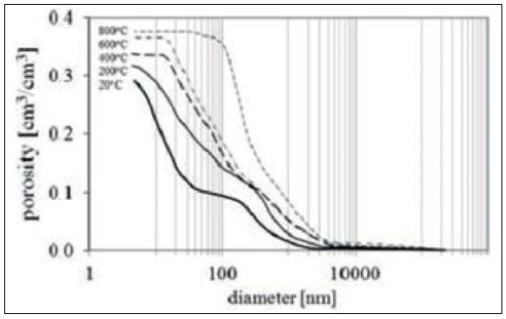
An extensive experimental study was carried out by Lublóy et al (Lublóy et al, 2016) to analyze the post-heating characteristics of concretes subjected to temperatures up to 800 °C. Major parameters of the study were the slag content of cement (0, 16, 25, 41 or 66 m%) and the value of maximum annealing temperature. The results indicated that (I) the number and size of surface cracks as well as compressive strength decreased by the increasing slag content of cements due to elevated temperature; (II) the most intensive surface cracking was observed by using Portland cement without addition of slag. The increasing slag content of cement increased relative post-heating compressive strength. Tendencies of surface cracking and reduction of compressive strength were in agreement, i.e. the more surface cracks, the more strength reduction.

On the other hand, type of cement had little effect on strength temperature characteristics (Santos and Rodrigues, 2016). Type of cement seems to be of minor influence as far as concretes are considered. Mortars (mix proportion 1:3:0.5) made with different types of cement showed significant differences. (Schneider, 1988). That result leads to studies performed by Bamonte and Gambarova (2007) that showed that the residual modulus of elasticity depends on the type of concrete, up to 400 °C, being that dependency vanished for higher temperatures (Santos and Rodrigues, 2016).

The heating of cement paste results in drying. Water evaporates from the material. The order in which water is removed from heated concrete depends on the energy that binds the water and the solid. Thus, free water evaporates first, followed by capillary water, and finally by physically bound water. The process of removing water that is chemically bound with cement hydrates is the last to be initiated. The mechanical properties of cement paste are strongly affected by chemical bonds and cohesion forces between sheets of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. It is assumed that approximately 50 % of cement paste strength comes from cohesion forces (important C-S-H gel sheet area); therefore, the evaporation of water between C-S-H gel sheets strongly affects the mechanical properties of the cement paste (Hager, 2013a).

Heating the cement paste with a C/S ratio around 1.5 to temperature above 100 °C produces several forms of calcium silicates, in general highly porous and weak. When the C/S ratio is close to 1.0 and the temperature is above 150 °C, a 1.5 to 1.0 tobermorite gel can form. At temperature between 180 °C and 200 °C, other silicates such as xonolite and hillebrandite may be formed. As soon as cement paste is heated to temperature of 500–550 °C, the portlandite content rapidly drops, as it decomposes according to the following reaction: $Ca(OH)_2 = CaO + H_2O$. The portlandite decomposition reaction explains the observed increase in CaO content in cement paste at the temperature of approximately 550 °C (Piasta, 1989ŝ Castellote et al., 20014). The CaO created in this reaction makes the elements made of the Portland cement practically redundant after cooling. The dehydration process of

Fig. 3: Effect of heating on cumulative pore of Portland cement paste heated to 200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C (w/c=0.6, Hager, 2013 a)



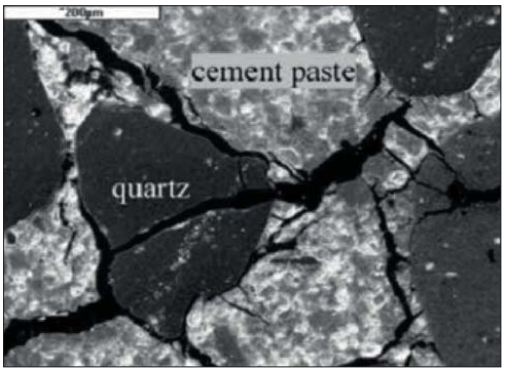


Fig. 4: The microstructure of concrete heated to 600 °C (SEM, 50x) concrete based on silicio-calcareous aggregates, f_c=75 MPa (Hager, 2013a)

the C-S-H gel reduces its volume, which in turn increases the porosity of the cement matrix. Moreover, during heating, the cement paste experiences a slight expansion up to temperature of approximately 200 °C (Piasta, 1989; Verbeck and Copeland, 1972, Khoury et al., 1985) although the intense shrinkage begins as soon as this temperature is exceeded. This significantly contributes to the porosity evolution of the cement paste. Due to heating total pore volume increases, as does the average pore size (*Fig. 3*) (Hager, 2013a).

The heating of concrete makes its aggregate volume grow, and at the same time it causes the contraction of the cement paste which surrounds it. As a result, the cement paste-aggregate bond is the weakest point in heated cementitious material. To a large extent, damage to concrete is caused by cracking, which occurs arising due to mismatched thermal strains between the coarse aggregates and the matrix. Fig. 4 shows an example of thermally damaged concrete, which is made of silico-calcareous aggregates, and heated to 600 °C. The SEM photo shows cracks crossing the cement paste and proceeding though the interfacial transition zone. Also, cracks passing through siliceous aggregate are present, indicating the tendency of some siliceous aggregates to break up at 350 °C (Khoury, 1992).

3.4 Type of aggregate

Aggregates occupy 70 to 80% of the volume of concrete and thus heavily influence its thermal behaviour. Type of aggregate is the main factor affecting the shape of the stress-strain curves. Concretes made with hard aggregates (siliceous, basaltic) generally have a steeper decrease of the initial slope with increasing test temperatures than those with softer aggregates (e.g., lightweight aggregates) (Schneider, 1988). Fig. 5 shows the stability and other changes of various aggregate types at elevated high temperatures (*fib*, 2007)**.**

A few reasons of why the aggregate is so important follow:

- It occupies some 60-80% by volume of concrete
- Variations in aggregate properties on heating can have a significant effect on the performance of concrete at elevated temperatures.
- Physico-chemical changes also occur in the aggregate depending upon the type of aggregate used, but aggregate differ greatly in their response to heat. A key factor in the behaviour of heated concrete is the chemical and physical stability of the aggregate. The choice of aggregate is, therefore, an important factor in determining the thermal properties, and thermal stability, of the concrete in fire.
- Restrains creep and shrinkage of the paste (*fib*, 2007).

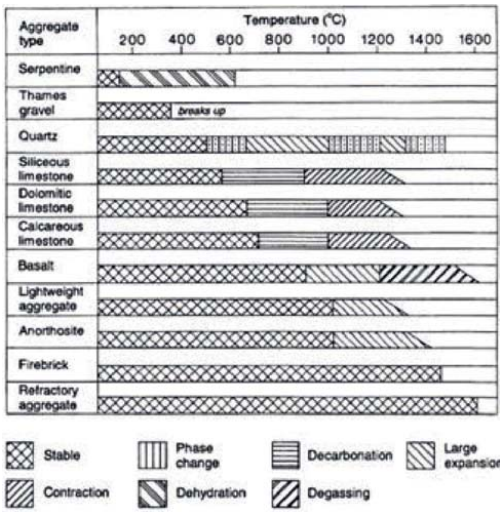


Fig. 5: Non-exhaustive examples of the large range of thermal stabilities and processes, those take place in aggregates during heating. Source (***fib*** 2007)

3.5 W/C ratio

Original strength and the water-cement ratio within the practical range of concrete application hardly influence the shape of stress-strain curves (*Fig. 6*) (Schneider, 1988).

The modulus of elasticity of heated concretes decreases in a similar way for all water-cement ratios. The relative values of modulus of elasticity seem to be independent of the water-cement ratio (see Fig. 6). For all three concretes the percentage drop in E value can be considered as quasi-identical. The increase in temperature generally leads to a consecutive fall in the modulus of elasticity value. However, the elasticity values depend to a large extent on whether the concrete is loaded during heating. It was reported that when constant loading of 20% of f_c is applied during heating, Young's Modulus may remain unchanged even up to 600 °C (Hager, 2013 a).

3.6 Aggregate/cement ratio

Aggregate-cement ratio has a significant effect on the modulus of elasticity and consequently also on the initial slope of the stress-strain curves. Mortars (high cement content!) indicate a lower initial slope than normal concretes; stress-strain curves of concrete indicate a somewhat greater curvature than those of mortars (Schneider, 1988).

From *Fig. 7* we can conclude the two main following results:

- Pure hydrated cement paste indicates contraction shrinkage at temperatures above 150-400 °C.
- The main factor affecting the thermal strain is the type of aggregate; the coarse aggregate fraction plays a dominant role (Schneider, 1988).

3.7 Supplementary materials

Dias et al. (1990) reported that although no initial signs of distress were visible on OPC pastes heated to 400 °C or above and cooled to room temperature, all specimens exhibited severe cracking to the point of disintegration after a few days. Above this temperature (400 °C) OPC pastes presented total

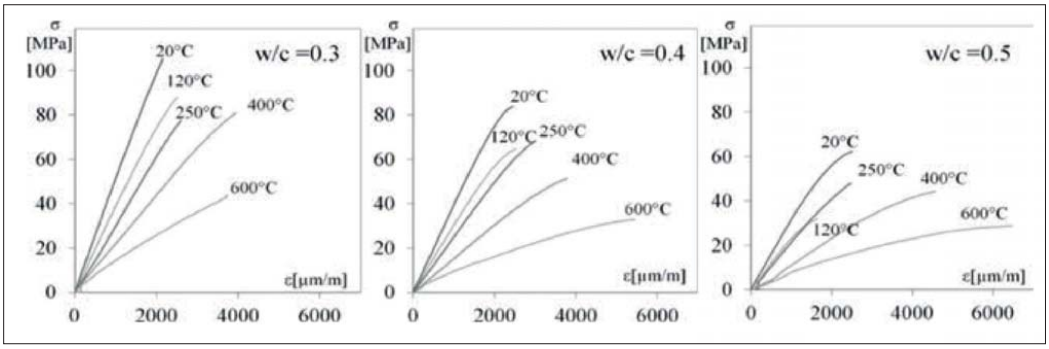


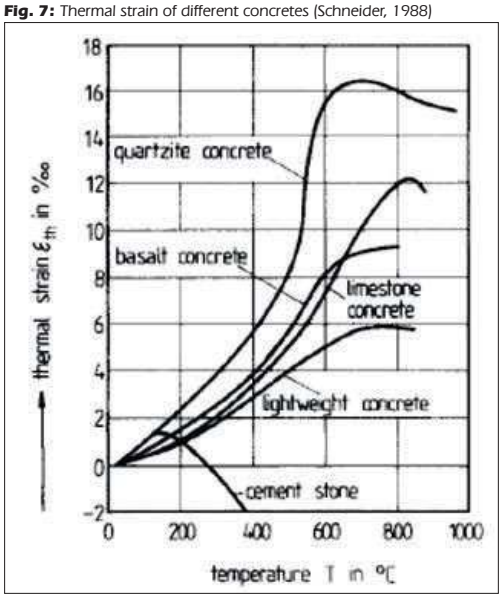
Fig. 6: *The stress-strain diagrams for concretes with w/c ratio of 0.3, 0.4, and 0.5, obtained at temperature of 120 °C, 250 °C, 400 °C, 600 °C (tested "hot", Hager, 2013a)*

strength loss due to dehydration of $CaOH_2$ and rehydration of CaO. However, dehydration of $CaOH_2$ and rehydration of CaO had no impact in pastes where OPC was partially replaced with ground granulated blast furnace slag, a by-product of the iron blast furnace industry. This is illustrated in *Fig. 8* (Mendes et al., 2012).

Poon et al. (2003) showed a comprehensive experiment comparing metakaolin (MK) and Fly Ash (FA) with different ratios compared to ordinary Portland cement (Poon et al., 2003). The mix proportions are given in *Table 2*. The results of the experiments shown in *Fig. 9*:

- The MK concrete showed a distinct pattern of strength gain and loss at elevated temperatures. - After gaining an increase in compressive strength at 200 °C, it maintained higher strengths as compared to the corresponding SF, FA and pure OPC concretes up to 400 °C.
- Within the range 400–800 °C, MK concretes suffered more loss and possessed lower residual strengths than the other concretes (Poon et al., 2003).
- Explosive spalling was observed particularly between 450 and 500 °C. The spalling frequency increased with the higher MK content. The vapour pressure build-up by dense pore-structure seems to be the obvious reason for such spalling.
- The MK concrete with 5% cement replacement showed better performance than the corresponding pure OPC and SF concretes at all tested temperatures. No spalling was observed in this concrete (Poon et al., 2003).

Fig. 7: *Thermal strain of different concretes (Schneider, 1988)*



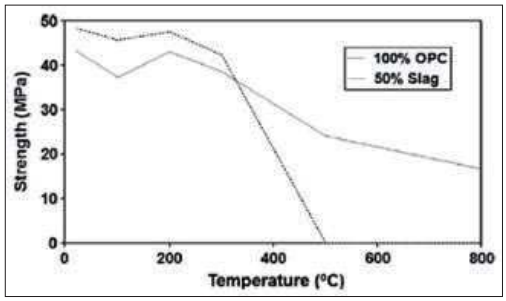


Fig. 8: *Compressive strength of OPC and 50% slag pastes at different temperatures (Mendes et al., 2012)*

Table 2. *Mix proportions of concrete mixtures (Poon et al., 2003)*

Mix	SF (%)	FA (%)	MK (%)	W/B	Batched quantities (kg/m³)					28 days compressive strength (MPa)
					Water	Cement	Fine agg.	Coarse agg.	SP[a]	
Normal strength concrete (NSC)										
NS-CC[b]	–	–	–	0.50	195	390	768	917	–	35.8
NS-MK5	–	–	5	0.50	195	370	710	1067	–	40.7
NS-MK10	–	–	10	0.50	195	351	620	1154	0.2	47.6
NS-MK20	–	–	20	0.50	195	312	618	1149	0.5	58.4
NS-FA20	–	20	–	0.50	195	312	615	1143	–	39.3

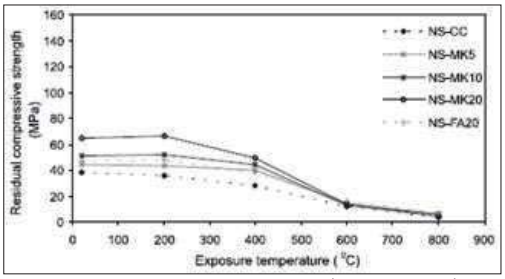


Fig. 9: Residual compressive strength of NSCs (Poon et al., 2003)

4. CONCLUSIONS

The present work presents the influence different parameters on the behaviour of concrete at elevated temperatures or on fire. The following conclusions may be drawn:

- The behaviour of a concrete exposed to fire is dependent, in part, on physical, thermal, and mechanical deformation properties of concrete.
- The extent of cement paste deterioration is mainly related to the rate of water absorption. Type of cement seems to be of influence as far as concretes are considered.
- Type of aggregate is the main factor affecting the shape of the stress-strain curves. Concretes made with hard aggregates (siliceous, basaltic) generally have a steeper decrease of the initial slope with increasing test temperatures than those with softer aggregates (e.g. lightweight aggregates).
- Supplementary materials have no significant effect on the mechanical properties of concrete certain range of temperatures; however they have an obvious effect on the normal compressive strength.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

6. REFERENCES

Castellote, C., Alonso, M. Andrade, C., Turrillasa, C. and Campoc, J. (2004), "Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction", *Journal Cement and Concrete Research* 34, 1633–1644.

Colombo, M., Felicetti, R. (2007), "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures", *Fire Safety Journal* 42 (6–7), 461-472.

Dias, WPS, Khoury, G.A., Sullivan, P.J.E. (1990), "Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C (1292F)", *ACI Materials J.*, 1990; 87 (2):160–6.

fib (2007), "Fire design of concrete structures, materials, structures and modelling", *fib* Bulletin 38, International Federation for Structural Concrete

Lublóy, É., Kopecskó, K., Balázs, G.L, Szilágyi, I. M., Madarász, J.,(2016), "Improved fire resistance by using slag cements", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 125:(1) pp. 271-279.

Hager, I. (2013a), "Behaviour of cement concrete at high temperature". *The Journal of Polish Academy of Sciences. Vol 61, Issue 1, Mar 2013. Poland*

Hager, I. (2013B), "Colour change in heated concrete", *Fire Technology*, 50, 945–958

Heikal, M., El-Didamony, H., Sokkary, T.M., Ahmed, I.A. (2013), "Behavior of composite cement pastes containing microsilica and fly ash at elevated temperature", *Constr Build Mater* 2013;38:1180–90.

Karakurt, C, Topcu, I.B. (2012), "Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete", *Constr Build Mater* 2012;35:906–11

Mendes A, Sanjayan J, Collins F. (2008), "Phase transformations and mechanical strength of OPC/slag pastes submitted to high temperatures", *Mater Struct*. 2008;41:345–50.

Kodur, V. R. (2014), "Properties of Concrete at Elevated Temperatures", *Civil Engineering Volume* Hindawi Publishing Corporation ISRN, Article ID 468510, 15 p.

Khoury, G.A., et al. (2001), "Fire Design of Concrete Materials Structures and Modelling", *Proceedings of the 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001.*

Khoury, G.A., Sullivan, G.P.E., and Grainger, B.N. (1985), "Strain of concrete during first heating to 600 °C under load", *Magazine of Concrete Research* 37 (133) 195–215.

Khoury, G.A. (1992), "Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment", *Magazine of Concrete Research* 44 (161), 291–309.

Khoury, G.A., Sullivan, P.J.E. and Grainger, B.N. (1984), "Radial temperature distributions within solid concrete cylinders under transient thermal states", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, No. 128, Sept. 1984

Mendes, A., Sanjayan, J. G., Gates, W. P., Collins, F. (2012), "The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to elevated temperatures, as in a fire event", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier 34 (2012) 1067–1074.

Nasser, K.W., Marzouk H.M. (1979), "Properties of mass concrete containing fly ash at high temperatures, *ACI J.* 76 (4) (1979) 537–551.

Piasta, J. (1989), "Heat deformation of cement phases and microstructure of cement paste", *Materials and Structures* 17 (102) 415–420 (1989).

Poon, C-S., Azhar S, Anson M, Wong Y-L. (2001), "Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures", *Cem and Concr Res* 2001;31:1291-300.

Poon, C-S., Azhar, S, Anson, M, Wong, Y-L. (2003), "Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier 25 (2003) 83–89.

Santos, C. C., Rodriguesb, J.P. C. (2016), "Calcareous and granite aggregate concretes after fire", *Journal of Building Engineering* 8 (2016) 231–242

Schneider., U. 1988. "Concrete at high temperatures—a general review," *Fire Safety Journal*, vol. 13, no. 1.

Short, N.R., Purkiss, J.A., and Guise, S.E. (2001), "Assessment of fire damaged concrete using color image analysis", *Construction and Building Materials 15, 9–15.*

Verbeck, G. and Copeland, L.E. (1972), "Some physical and chemical aspects of high pressure steam curing", *Menzel Symposium on High Pressure Steam Curing ACI SP-32*, 1–131 (1972).

Wang, H.Y. (2008), "The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS", *Cem and Concr Compos* ;30:992–9.

Xu, Y., Wong, Y.L., Poon, C-S., Anson, M. (2003), "Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures", *Cem and Concr Res.* 2003;33:2009–16.

Yu, X., Wong, Y.L., Poon, C.S., Anson, M. (2000), "Damage to PFA concrete subject to high temperatures", *Proceedings of International Symposium on High Performance Concrete-Workability, Strength and Durability, Hong Kong, 2000 pp.1093–1100.*

Naser Alimrani (1989), PhD student at the Department of Construction Materials and Technologies, Budapest University of Technology and Economics. His main fields of research interest are: fire design and behaviour of concrete at elevated temperature.
alimrani.naser@epito.bme.hu

Abdelmelek Nabil (1992), PhD student at the Department of Construction Materials and Technologies, Budapest University of Technology and Economics. His main fields of research interest are: fire design and behaviour of concrete at elevated temperature.
abdelmelek.nabil@epito.bme.hu

György L. Balázs (1958), Civil Engineer, PhD, Dr.-habil., professor of structural engineering, head of Department of Construction Materials and Technologies and Deputy Dean of the Civil Engineering Faculty of Budapest University of Technology and Economics (BME). His main fields of activities are experimental investigation and modelling of RC, PC, FRC structures, HSC, fire resistance of concrete. He is chairman of several commissions and task groups of ***fib***. He is president of Hungarian Group of ***fib***, Editor-in-chief of the Journal "Concrete Structures". He was elected as President of ***fib*** for the period of 2011-2012.
balazs.gyorgy@epito.bme.hu

Éva Lublóy (1976), **Dr.-habil, PhD, Senior lecturer in structural engineering**, at the Budapest University of Technology and Economics. Her main fields of interest are: fire design, behaviour of constructions materials at elevated temperature. Member of the Hungarian Group of ***fib***.
lubloy.eva@epito.bme.hu

STRUCTURAL CONSEQUENCES OF FIRE ON CONCRETE STRUCTURES - REVIEW ARTICLE

Naser Alimrani, György L. Balázs
Department of Construction Materials and Technologies
Budapest University of Technology and Economics
H-1521 Budapest

SUMMARY

Concrete structures are frequently exposed to fire. Present paper intends to give an overview of possible consequences of fire on concrete structures in order to be able to further develop aspects of material characteristics and structural design. Fire assessment and design must include thermal analysis as well as considerations on material and structural characteristics. Assessment of load bearing and heat exposure is required together with an analysis of structural response and an appropriate choice of structural system and components, including joints and supports. As one of the most serious structural consequences of fire, explosive spalling of concrete cover is likely to occur when rate of heating during fire increases causing serious consequences to structure and people.

1. INTRODUCTION

1.1 Fire action

Fire in buildings occurs with unwelcome frequency. In spite of intensive efforts, it has not been possible to reduce the consequences of the fire substantially. Fire protection is achieved through a range of measures, including planning of evacuation routes and protection against smoke or toxic gases, as well as the fire design of load-bearing members (*fib,* 2010). The increasing internal temperature causes a fall-off in the elastic modulus and the yield strength of the steel reinforcement. The effects of temperature on the steel properties become noticeable at 200 °C; they are significant at 400 °C and very serious at 600 °C (*fib,* 2010). The compressive strength and stiffness reductions are severe; the load-bearing capacity of individual members can fall to the level of the sustained loads, which are acting, so local collapse can occur. Large deflections take place prior to collapse owing to the loss of elastic stiffness in both the steel and concrete. At an even earlier stage, structural damage will commence with spalling of cover concrete at edges and corners due to temperature gradients (See more details on spalling in Section 4.2.). If the structure is prone to progressive collapse, the loss of one member due to the effects of fire can trigger an overall collapse (*fib,* 2010).

1.2 Heating of the structure

The most direct effect of a fire on a structure is the temperature increase in a first phase, and then a progressive decrease as the fire reduces until extinction (*fib*, 2008). During the heating phase (During cooling phase also) heat is introduced in (or evacuated from) the structure by a combination of:

- convection from the surrounding gas,
- radiation from the surrounding gas if it is opaque, fire resource or compartment (*fib*, 2008).

1.3 Factors affecting failure

It has very often been pretended that temperature is not uniform in concrete elements whereas it is more or less uniform in steel elements because of the significant difference in thermal conductivity: approximately 45 W/(m·K) for steel and 2 W/(m·K) for concrete (*fib*, 2008). The thermal conductivity of concrete depends on the conductivities of its constituents. The major factors are the moisture content, the type of aggregate and the mix proportions (Schneider, 1988).

The level of temperature differences observed in a section depends on several factors, the most important ones being (*fib*, 2008):

- The increase rate of the fire. The faster the elevation of temperature is, the higher the temperature differences are.
- The severity of the fire, in terms of duration and maximum temperatures. A short fire will obviously not allow sufficient energy to be introduced in the section.
- The shape of the section. In fact, the thermal massivity considered, as the ratio between the exposed surface and the volume to be heated, is a good indication of the level of temperature differences. A thin column will have lower than a massive one.

2. THERMAL PROPERTIES

Fire assessment and design calculations must include thermal analysis as it is required for simplified and complex calculations. It is also required for analysis of separating or load-bearing function. A key to the success of thermal analysis is the appropriate choice and use of the thermal properties (*fib*, 2007). Nevertheless, design practically for thermal expansion only requires rough estimates of how the structure will expand and deform under fire, although it may be necessary to consider also the cooling down period (*fib*, 2010).

2.1 Thermal expansion of concrete

The thermal expansion of concrete can be expressed as a function of temperature. Siliceous concrete has values of about $10 \times 10^{-6}\ \theta_c$ for concrete temperatures (θ_c) between 20 and 200 °C and of about $12 \times 10^{-6}\ \theta_c$ for θ_c over 200 °C (Fig. 1). For the simple assessment of normal reinforced concrete in fire in case of $\theta_c \approx 600$ °C, we may take (*fib*, 2010):

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \times 10^{-6}\ \theta_c \tag{1}$$

For concrete made with lightweight aggregates

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \times 10^{-6}\ \theta_c \tag{2}$$

2.2 Thermal expansion of steel

Average thermal expansion for ferrite steel over a temperature (θ_s) range of 100 to 650 °C is shown in Fig. 2 The coefficient of expansion for steel also does not vary linearly with temperature, but increases as temperature increases (Abrams, 1977). For the simple assessment of normal steel, average values of thermal expansion are about $12 \times 10^{-6}\ \theta_s$ (*fib*, 2010).

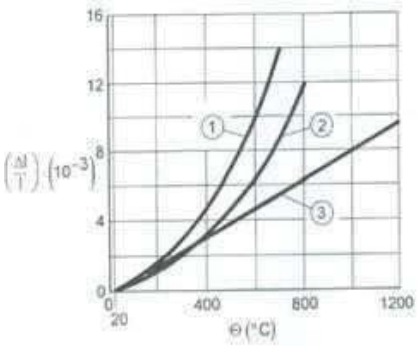


Fig. 1: Thermal elongation of concrete (1): Silicious aggregate,(2) Calcarious aggregate, (3) Lightweight aggregate

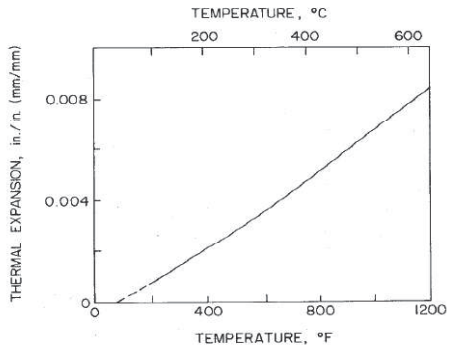


Fig. 2: Thermal expansion of ferrite steels

2.3 Load induced thermal strains

Load induced Thermal Strain (LITS) is obtained from the difference in strain between the thermal strain of an unloaded concrete specimen and the strain measured under constant load applied prior to heating and maintained constant during heating (Fig. 3; *fib*, 2007).

During initial phase of heating an expansion occurs in aggregate while cement paste experiences shrinkage. Results are shown in Fig. 4. It would seem that thermal incompatibility between the aggregate and cement paste could cause damage to concrete, however it does not happen. During the virgin heating the concrete's components move mutually, shrinking cement paste accommodate to aggregate expansion and consequently concrete under compression. Therefore shortening could appear against elongation in loaded structural elements (Chudzik et al., 2017). Aforementioned phenomenon defined as a transient thermal creep (TTC) was probably the first reported by Johansen and Best in 1962 and after that was confirmed by other scientists (Khoury et al., 1985). TTC is normally by far the largest component of LITS (*fib*, 2007). It occurs in concrete during first heating to a given temperature, but not during cooling or re-heating to the same temperature under load.

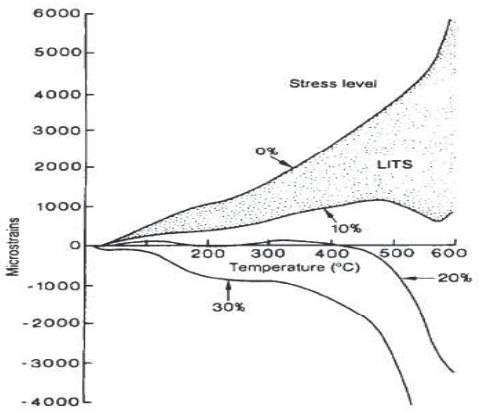


Fig. 3: LITS for the BI-Basalt concrete during heating at 1°C/minute, determined as the difference between the thermal strains under 0%, 10% 20% and 30% load

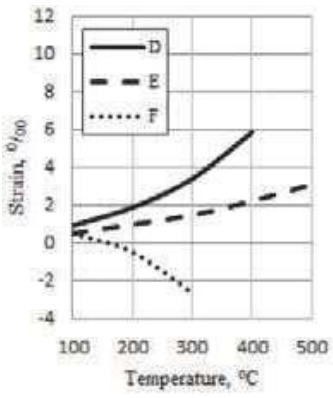


Fig. 4: Experimental results obtained during heating: D-gravel concrete, E-basalt concrete, F-cement paste (Chudzik et al., 2017).

Expansion joints

As a rough guide, the minimum width (e) of an expansion joint for fire should be e = 40 mm, at 30 m spacing. The joint filling material should have sufficient durability and must be non-combustible; the sealing material may be combustible (Fig. 5; *fib*, 2010).



Fig. 5: Example of expansion joint (*fib*, 2010)

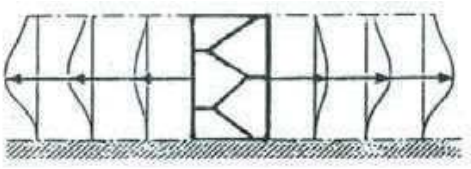


Fig. 6: Effect of central stairwell on surrounding columns (no expansion joint) (*fib*, 2010)

Further issues regarding expansion joints include the following example. Considering the columns supporting the slab in the case of the central constraint provided by the staircase, severe displacement at the column heads is likely to occur, as in Fig. 6 with horizontal forced acting on the columns. Expansion joints would be needed to protect the columns. It should be noted that expansion joints in separating walls and slabs need special detailing (*fib*, 2010).

3. STRUCTURAL FIRE DESIGN

3.1 Fire severity

The severity of a fire in a structure is dependent on many factors. However, building authorities assume for design purposes that a structure will be subjected to the worst case fire, and indeed this approach is supported by the conventional wisdom of fire brigade experience, which is that any kind of combustible material will eventually burn (*fib*, 2010). The severity of a fire depends on three main factors:

- available fuel,
- ventilation, i.e. air supply available to promote its growth,
- the characteristics of the compartment where the fire commences (*fib*, 2010).

Current building controls in most countries express the standard of safety for a building in terms of the fire requirements for individual elements. The intention is to ensure that the building structure does not collapse and that the separating elements are maintained during fire. Fire resistance requirements are expressed for specified periods ranging from 30 to 240 minutes (*fib*, 2010). According to the limit states philosophy a strength limit state is reached when a member can no longer carry its design load when combined with any additional thermally-induced loading.

3.2 Structural response

Building regulations in most countries provide for a minimum fire-protection strategy. Additional standards contain design aids for fire in the form of tables for minimum dimensions and minimum concrete cover of beams, slabs, columns, tension members. New standards such as the Eurocodes allow for additional computational methods to predict the development of fire in buildings and the response of the structure to the fire (*fib*, 2010).

In the design of a concrete structure for fire, an assessment of the loads and heat exposure is required, together with an analysis of structural response and an appropriate choice of structural system and components, including joints and supports.

The fire response of reinforced concrete (RC) members is influenced by the characteristics of constituent materials, namely, concrete and reinforcing steel. These include (a) thermal properties, (b) mechanical properties, (c) deformation properties, and (d) material specific characteristics such as spalling in concrete (Kodur, 2014). All these properties vary as a function of temperature and depend on the composition and characteristics of concrete as well as those of the reinforcing steel (Kodur and Harmathy, 2008).

3.3 Fire resistance

The fire resistance of a whole concrete structure would not necessarily be that ascribed to its individual elements. It could be better or worse. Better fire behaviour could arise from such factors as robustness, adequate continuity of reinforcement, reduced level of loading, load sharing mechanisms and the availability of alternative paths for load support. Continuity of reinforcement in design allows the redistribution of forces and moments to gradually take place towards the parts of the structure not exposed to the fire (*fib*, 2007). Worse fire resistance could arise from loads introduced by the thermal deformations, acting also on unexposed parts of the structure. For instance, columns can shear off as a result of the thermal expansion of a fire exposed floor, (Fig. 7). These thermal loads can cause deteriorations in concrete structures, such as cracks, leading to a reduced load-bearing capacity thus, premature failure could occur. It is, therefore, necessary to pay particular attention to detailing of reinforcement and building layout (*fib*, 2007).

4. DAMAGE CAUSED BY FIRE EXPOSURE

Reparability means the ability of a structure or a part thereof, to be restored to an agreed level of safety, in practical use comparable to that before the fire occurred. Its judgment in most cases will be influenced by economic considerations, but under specific circumstances, high financial expenses for the repair may be unjustifiable (CEB, 1991). Judgment of reparability should start with the attempt to obtain an overall image of the event, the fire (*fib*, 2010).

A visit to the place of the fire should be undertaken by an expert in fire design as soon as it seems possible without endangering any persons. Not only the specific damages of the affected structural members, such as deformations, cracks, spalling and disintegration of concrete, etc., but the overall condition of the structure and the building should be carefully recorded (*fib*, 2010). The damage is generally material and structural damage with different ratios. This paper is covering the structural damage only.

4.1 Structural damage

The bond between concrete and reinforcement may be affected by the heating process. The residual bond strength does not only depend on the temperature reached and on the exposure time, but in addition on the condition of the steel surface. The pre-stress which possibly decreases during a fire, can partly be regained during the cooling down period. Fig. 8 shows, results derived from tests with high tensile pre-stressing wires of 9 mm diameter.

Cracks occur in any reinforced or pre-stressed concrete element when exposed to a heating, extinguishing and cooling down process. There are several reasons causing this phenomenon, such as (*fib*, 2010):

- deformation due to mechanical influences and the thermal conditions,
- the temperature gradient in the cross section,
- different temperature rise at the change of the size and shape of a cross section,
- different thermal elongation of cement matrix-aggregates, or concrete-reinforcing steel
- restraints of the re-contraction during the cooling-down process,
- sudden cooling-down by a fire extinguishing hose stream.

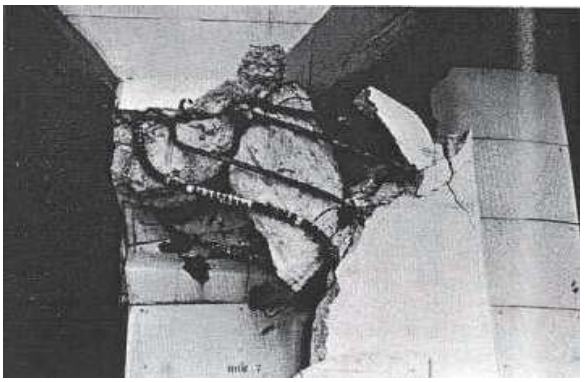


Fig. 7: Example of a shear failure in an unexposed concrete column due to the thermal expansion of the fire exposed floor connected to it (Beitel and Iwankiw, 2002)

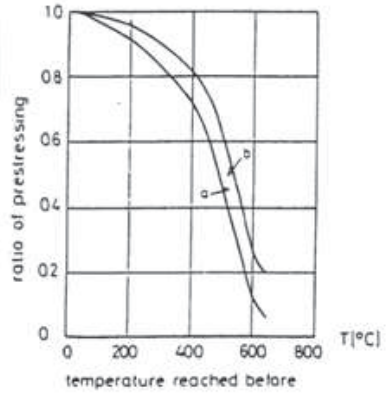


Fig. 8: Decrease of pre-stressing force under elevated temperature (a) and after cooling down (b) (CEB, 1991)

4.2 Spalling

Spalling is the violent or non-violent breaking off of layers or pieces of concrete from the surface of a structural element when it is exposed to high and rapidly rising temperatures as experienced in fire (Khoury, 2006). The rates of heating of the concrete surface in building fires are typically 20-30 °C and in tunnel fires can arise by about 250 °C/minute. Spalling could be grouped into six categories (*fib*, 2007):

- aggregate spalling,
- explosive spalling,
- surface spalling,
- sloughing off spalling,
- corner spalling and
- post cooling spalling.

Among these categories, which have no clear dividing line between some of them, explosive spalling is considered to be the most serious form of spalling in a fire situation. It could result in explosive removal of a concrete layer up to 25-100 mm thick (*fib*, 2007). Spalling of concrete cover may have two reasons: (1) internal vapour pressure (mainly for conventional concretes) and (2) overloading of concrete compressed zones (mainly for high strength

concretes) (Balazs and Lubloy, 2009). The spalling mechanism of concrete cover can be seen in Fig. 9.

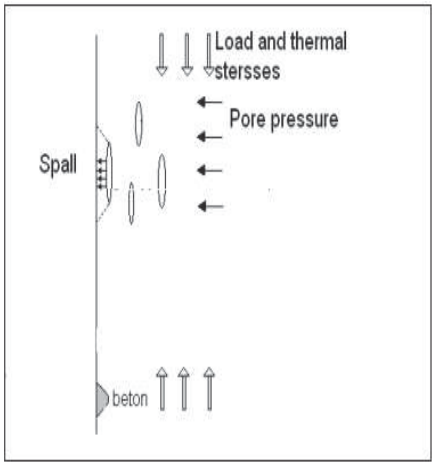


Fig. 9: Mechanism of spalling (Høj, 2005)

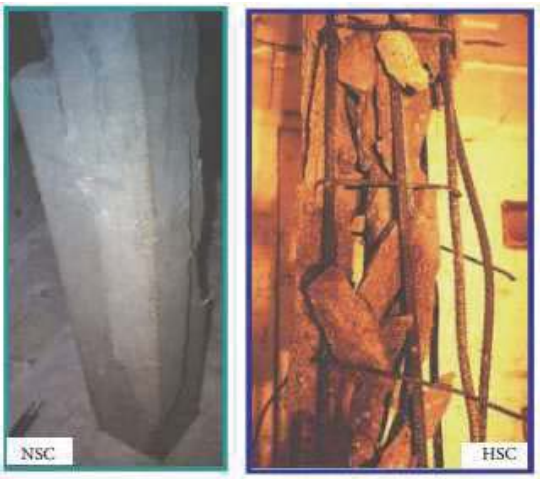


Fig. 10: Relative spalling in NSC and HSC columns under fire conditions (Kodur, 2014)

For example, thermal stress spalling would not develop in a concrete that has zero thermal expansion as experienced with some lightweight aggregate concretes. This allows the determination of the influence of pore pressure spalling. However, it should be noted that lightweight aggregate is highly porous and the additional moisture in the pores would promote pore pressure spalling (Khoury, 2008). For more details, see: "Explosive spalling of concrete in fire", PhD research by Eike Wolfram Heinrich Klingsch (2014).

Although spalling might occur in all concretes, high strength concrete (HSC) is believed to be more susceptible to spalling than normal-strength concrete (NSC) (See Fig 10), because of its low permeability and low water-cement ratio (Noumowe et al, 2009). The high water vapor pressure, generated due to a rapid rise in temperature, cannot escape due to high density (and low permeability) of HSC, and this pressure build-up often reaches the saturation vapor pressure (Deideriches et al, 1995). Balazs and Lubloy (2012) suggested that thin and short steel fibers contribute to the residual compressive strength after high-temperature loading (Balazs and Lubloy, 2012).

Factors influencing explosive spalling *(fib, 2010)*

Permeability: It is an important factor because it affects the rate of vapour release. Concrete of higher quality generally possess higher density and a finer pore structure and therefore offers higher resistance to moisture flow.

Age of concrete: The majority of reports suggest that the probability of spalling reduces with age, although this may be due to the low moisture level in older concretes.

Strength of concrete: Ironically, poor quality concrete is superior to good concrete in spalling. High strength concrete with low permeability and good durability is in fact a low performance concrete at high temperature.

Type of aggregate: It can be generally concluded that the likelihood of thermal stress explosive spalling is less for concrete containing a low thermal expansion aggregate

Cracking: Internal cracking has a dual effect upon explosive spalling. While micro cracks facilitate the escape of moisture, they also provide sites for crack propagation.
There are also other affecting factors such as: reinforcement, cover to reinforcement, steel fibres and polypropylene fibres.

Preventing explosive spalling

Khoury (2008) proposes that "In terms of prevention, the correct approach would be to address the mechanisms when it comes to the design of the concrete, or alternatively use a thermal barrier which could be significantly more expensive but which would also provide benefits in preventing the deterioration of mechanical properties owing the lower temperatures of exposure to the substrate concrete". He stated two suggestions, thermal barriers and concrete mix design in order to prevent or even to decrease spalling (Khoury, 2008).

5. CONCLUSIONS

Concrete structures are frequently exposed to fire. Structures exposed to fire are generally experiencing increasing of elevated heat from ignition to distinction of fire. Fire assessment and design calculations must include thermal analysis since constituents of concretes including reinforcement behave in different ways when exposed to fire. During heating concrete also experiences thermal strain, shrinkage, as well as load induced thermal strain (LITS). LITS comprises several components such as irrecoverable transient thermal creep.

Fire response of concrete structural members is dependent on the thermal, mechanical, and deformation properties of concrete which vary significantly with temperature and depends on the composition and characteristics of concrete batch mix as well as heating rate and other environmental conditions. Damage of the structure includes damage of material and reduction of structural properties. There are two mechanisms of explosive spalling, thermal stress spalling and pore pressure spalling. Rapid heating during fire could induce explosive spalling with serious consequences to structure and people.

Present paper intended to give an overview of possible consequences of fire on concrete structures in order to be able to further develop aspects of material characteristics and structural design.

6. AKNOWLEDGEMENTS

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

7. REFERENCES

Abrams, M. S. (1977), "Performance of Concrete Structures Exposed to Fire", Research and Development Bulletin RD060, Portland Cement Association.

Balazs, G. L. Lubloy E. (2009) "Concrete in fire”, Műszaki Szemle, folyóirat, Kolozsvár, Románia. Vol. 47, pp 3-10, ISSN 1454-0746

Balazs, G. L. Lubloy, E. (2012), "Post-heating strength of fiber-reinforced concretes", Fire Safety Journal, Vol 49. pp 100-106, Elsevier

Beitel, J. Iwankiw, N. (2002), "Analysis of Needs and Existing Capabilities for Full-Scale Fire Resistence Testing", NIST report GCR 02-843, Gaithersburg, USA.

CEB (1991), "Fire design of concrete structures", Bulletin 208. Comité Euro-International du Béton, Lausanne, Switzerland.

Chudzik, P. Kowalski, R. Abramowicz, M. (2017), "Strains of concrete in RC structures subjected to fire". International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures AMCM'2017. Elsevier Ltd.

Diederichs, U. Jumppanen, U. Schneider, U. (1995) "High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete," in Proceedings of the 4th Weimar Workshop on High Performance Concrete, HAB, Weimar, Germany.

fib (2007), "Fire design of concrete structures, materials, structures and modelling", *fib* Bulletin 38, International Federation for Structural Concrete

fib (2008), "Fire design of concrete structures, materials, structural behaviour and assessment", *fib* Bulletin 46, International Federation for Structural Concrete

fib (2010), "Structural Concrete – Textbook on behaviour, design and performance", *fib* Bulletin 54, International Federation for Structural Concrete

Høj, N. P. (2005) "Keep concrete attractive - Fire design of concrete structures", Proceedings of fib symposium on Keep concrete attractive, edited by Gy. L. Balázs, A. Borosnyói , 23-25 May 2005 Budapest, pp.1097-1105

Khoury, G. A. (2006), "Strain of concrete during two thermal cycles. Part 1 : strain over two cycles, during first heating and at subsequent constant temperature". Magazine of Concrete Research, 58, No. 6, August, 367-385

Khoury, G. A. (2008), "Fire and concrete. Encontro Nacional Betão Estrutural". BE2008 – Guimarães – 5, 6, 7 de Novembro.

Khoury, G. A. Grainger, B. N. Sullivan, P. J. E. (1985), "Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents". Magazine of Concrete Research. Vol. 37, No. 132, pp. 131-144.

Klingsch, E. W. H. (2014) "Explosive spalling of concrete in fire", PhD Research. Institute of Structural Engineering (IBK), ETH ZURICH. Gifhorn, Germany.

Kodur, V. R. (2014), "Properties of Concrete at Elevated Temperatures", Civil Engineering Volume Hindawi Publishing Corporation ISRN, Article ID 468510, 15 p.

Kodur, V. R. Harmathy, T. Z. (2008) "Properties of building materials," in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, P. J. DiNenno, Ed., National Fire Protection Association, Quincy, Mass, USA

Noumowe, A. N. Siddique, R. Debicki, G. (2009) "Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 °C)," Construction and Building Materials, vol. 23, no. 5, pp. 1855–1861, 2009

Schneider, U. (1988), "Concrete at high temperatures—a general review," Fire Safety Journal, vol. 13, no. 1.

A beton kémiai ellenállóképességének fokozása
Enhancing chemical resistance of concrete

Dr. KOPECSKÓ Katalin[1] egyetemi docens – MLINÁRIK Lilla[1] doktorjelölt –
Dr. habil LUBLÓY Éva[2] egyetemi docens – Dr. Salem G. NEHME[2] egyetemi docens –
Prof. BALÁZS L. György[2] egyetemi tanár

[1]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.
E-mail: kopecsko.katalin@epito.bme.hu Tel: (36-1) 463-2238, Fax: (36-1) 463-2017
http://gmt.bme.hu/
[2]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. http://em.bme.hu/

Abstract

This paper addresses to overview the possible methods to prevent or minimize the deterioration of concrete, which confronts acidic environment. Primarily, the mechanism of reaction between alkaline concrete and acid is demonstrated. The mechanism of reaction clearly sets guidelines as to how the chances of this disastrous reaction should be minimized or eliminated. The suggested preventive measures are two-fold i) the improvement of the basic microstructure of concrete and ii) the provision of barriers against acids. Acid resistance of concrete can be enhanced using classical as well as novel techniques like nanotechnology. There is an immense need that these measures are recognized and implemented by the construction industry to put a stop to huge money losses.

Összefoglaló

Cikkünkben a beton savas környezettel szembeni ellenállóképességének növelésével foglalkozunk. A lúgos kémhatású beton és a savak közötti reakció mechanizmusa egyértelműen leírható. A reakció mechanizmusa meghatározza, miként lehet minimálisra csökkenteni a tönkremeneteli reakciók esélyeit. A javasolt megelőző intézkedések kettősek: a beton mikrostruktúrájának javítása és a savak hatása elleni védekezés. A betonok ellenállóképességének fokozása a savas környezetben fokozható mind hagyományos, mind új módszerekkel, például a nanotechnológiával. A gazdasági károk elkerülése érdelében szükséges, hogy ezeket a lehetőségeket az építőipar megismerje és használja.

Kulcsszavak: cement, beton, kémiai ellenállóképesség, nanotechnológia

1. BEVEZETÉS

A beton népszerűségének fő oka a viszonylag alacsony költség, a könnyű alkalmazhatóság és a relatív hosszú élettartam a többi anyaghoz képest. A beton alkalmazásának hátránya, hogy a beton mikroszerkezete lehetővé teszi a víz és egyéb ártalmas anyagok behatolását, ami a beton korrózióját hozza létre. A beton áteresztőképessége lehetővé teszi az agresszív környezeti hatások (pl. kloridok, széndioxid és savak) bejutását akár az acélbetétekig, amely aztán a szerkezet teljes tönkremenetelét okozhatja [1].

Általánosságban elmondható, hogy a beton ellenállóképessége a kémiai hatásokkal szemben gyenge. A vasbetonban a betonra vagy a beágyazott acélbetétre ható legjelentősebb kémiai hatások a következők: a kloridionok behatolása, a szulfátionok támadása, a széndioxid hatására bekövetkező karbonátosodás, az alkáli-adalékanyag reakciók és a savas környezet hatása [2, 3].

A kloridionok az acélbetét passzív védelmét tehetik tönkre, amely védi az acélt a korrózió ellen. A kloridionok a beton összetevői (pl. a homok vagy a keverővíz) által, illetve a környezetből (pl. jégmentesítő sózás vagy tengervíz) kerülhetnek a betonba. A korrózió következtében az acélbetétek térfogata csökken, ugyanakkor a korróziós termék (rozsda) felhalmozódik az acélbetét felületén, amely a

beton húzófeszültségének függvényében a betonfedés megrepedéséhez, majd leválásához vezet [4, 5]. A talajban, talajvízben vagy tengervízben jelen lévő szulfátok a cement trikalcium-aluminát (C_3A) hidrátjaival reagálnak. A reakció során keletkező vegyület (ettringit, $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}\cdot 26H_2O$) a beton duzzadását, majd dezintegrációját, szétesését eredményezi. Olyan körülmények között, ahol szulfátionok koncentrált jelenléte kimutatott vagy várható, a beton tönkremenetele szulfátálló (alacsonyabb C_3A tartalmú vagy C_3A-mentes) cement alkalmazásával előzhető meg [6, 7]. A beton pórusoldata a kalcium-hidroxid ($Ca(OH)_2$) és az alkálifém-hidroxidok jelenléte miatt lúgos jellegű. Ez a lúgos környezet védi meg az acélbetétet a korróziótól. A széndioxid (CO_2) jelenléte a lúgosság megszűnését eredményezheti. Ezt, a beton portlandit ($Ca(OH)_2$) tartalma és a levegőből származó szén-dioxid közötti reakciót nevezzük karbonátosodásnak [8]. A karbonátosodás kalcium-karbonát ($CaCO_3$) és víz képződéséhez vezet, ennek következtében a beton lúgossága csökken és az acélbetét sebezhetővé válik az oxigén és nedvesség jelenlétében. Az adalékanyagok és a cementkőben levő alkáliion tartalom közötti reakciót alkáli-adalékanyag reakciónak nevezzük. A reakció térfogatnövekedéssel jár, a reakciótermék a beton repedését eredményezi [6].

2. A SAVAS KÖRNYEZET KIALAKULÁSA ÉS HATÁSA A BETONRA

A cementkötésű műtárgyak sok esetben ki vannak téve az agresszív környezet károsító hatásainak. Ezekben a szerkezetekben az agresszív folyadékok, gőzök vagy gázok korróziót okoznak, amelyek csökkentik a szerkezetek tartósságát, használati élettartamát. Agresszív vizes környezet alakulhat ki például az épületek alapjainál, ahol a műtárgy talajvízzel, szennyvízzel érintkezik, vagy ki van téve szulfátionok támadásának. Szintén ide sorolhatók a tengerparti létesítmények, amelyeket a sós tengervízzel érintkezve jelentős szulfát-, magnézium- és kloridion-támadás ér. Gátak, vízvezetékek és egyéb szerkezetek lágy vízzel, vagy oldott, agresszív széndioxidot tartalmazó vízzel érintkezve kilúgozódnak vagy karbonátosodnak. Számos iparág, mint például a tejipar, a cukoripar vagy a gyógyszeripar nagy mennyiségű szennyvizet termel. A lakossági szennyvizek gyűjtése és kezelése során is agresszív kémiai környezet alakulhat ki.

A szennyvizek változatos összetételűek, azonban néhány közös jellemző megállapítható. A szennyvizek oldat, vagy szuszpenzió formájában összetett szerves vegyületeket, ásványi anyagokat és mikroorganizmusokat (főleg baktériumokat) tartalmaznak. A mikroorganizmusok anyagcseréje savakat termel, és a baktériumok erjesztési folyamata során felszabaduló CO_2 pedig karbonátosodást okoz [9, 10, 11, 12]. Az ipari, és mezőgazdasági szennyvizek elsősorban szerves savakat tartalmaznak, amelyek lehetnek mono-, di- és trikarbonsavak. Ezek a savak ún. alacsony szénatomszámú zsírsavak, például: ecetsav, propionsav, tejsav, oxálsav, citromsav [13]. A szerves savak általában gyenge savak, amelyek csak részben hidrolizálnak a vízben, és reakcióba lépnek a cementkő hidratált és nem hidratált. A reakció termékei nagyrészt a támadó sav kalcium sói, valamint a dekalcinált hidratációs termékek.

Számos esetben szervetlen savak károsítják a szerkezetet. Ezek többnyire erős savak: kénsav, sósav, salétromsav. A betonban, például sósav hatására jól oldódó kalcium-klorid képződik, salétromsav hatására jól oldódó kalcium-nitrát keletkezik, illetve kénsav hatására kis oldhatóságú kalcium-szulfát képződik, amely gipszként csapódik ki. Az első két esetben a kialakult kalcium-sók oldhatósága, míg az utolsó esetben a csapadékképződés mértéke és az ez által kialakult réteg vastagsága, valamint annak porozitása határozza meg a károsodás mértékét [14, 15].

Ha a betont a HX általános képletű sav (ahol X a sav negatív ionja, anionja) megtámadja, akkor a cementmátrix komponensei közül a portlandit reagál a savval a következő sav-bázis reakcióban (1) [16]:

$$2\ HX + Ca(OH)_2 \rightarrow CaX_2 + 2\ H_2O \quad (1)$$

A beton tönkremenetele a cementkő porozitásától, a sav koncentrációjától, a savanyú kalcium sók (CaX_2) oldhatóságától és a folyadéktranszport mértékétől függ [17]. Az oldhatatlan kalcium sók kicsapódhatnak az üregekben, ezáltal lassíthatják a savas közeg hatását. Azok a savak, amelyek kalcium sói könnyen oldhatóak és eltávolíthatók, mint a salétromsav, a sósav és az ecetsav, nagyon agresszívnek minősíthetők. Az egyéb savak, mint például a foszforsav és a huminsav, kevésbé károsak, mivel kalcium sóik oldhatósága kicsiny, így a savas támadást azáltal gátolják, hogy blokkolják a cementkőben a

behatolás útvonalát és a transzportfolyamatokat az egymással kapcsolatban levő repedésekben, üregekben és porozitásban. Ugyanakkor a kénsav rendkívül káros a betonra, mivel a sav-bázis reakció és a szulfátok hatása egyaránt károsítja a betont [18].

Amint a cementkőben található összes portlandit reagált a savval, a sav a CSH fázisokat kezdi felbontani, ami által a szilárdságvesztés is felgyorsul.

3. KÜLÖNLEGES BETONOKKAL A SAVÁLLÓSÁG FOKOZÁSÁBAN

A savas környezet hatásának mértéke a beton porozitásával is befolyásolható, ezáltal a korróziós kockázat csökkenthető. Minél kisebb az összporozitás, annál kisebb lesz a savas környezet hatása a betonra. Általánosságban elmondható, hogy minden nagy teljesítőképességű betonkeverék nagyobb ellenállást mutat a savas támadással szemben, mint a szokásos (normál) betonok [19]. A nagy teljesítőképességű beton áteresztőképessége kicsiny, így a környezetből származó károsító komponensek diffúziója is csökken [17]. Amennyiben a betonhoz felhasznált anyagokkal, a betonnak a szilárdulása során kialakuló tulajdonságokkal szándékozunk elérni a megfelelő védelmet az agresszív közegekkel szemben, ezt elsődleges védelemnek nevezzük. A beton savakkal szembeni ellenállóképességet úgy is biztosíthatjuk, hogy felületét saválló bevonattal látjuk el. A bevonatok azonban már a másodlagos védelem szintjét képviselik.

3.1 Ellenállóképesség fokozása cement kiegészítő anyagokkal

A cement kiegészítő anyagoknak (supplementary cementitious materials, SCMs) két csoportját különböztethetjük meg. Az I. típusú kiegészítő anyagok a közel inert kiegészítő anyagok (pl. mészkő liszt). A II. típusú kiegészítő anyagok a puccolános vagy latens hidraulikus tulajdonságú kiegészítő anyagok. Ez utóbbi csoportba tartozik az erőműi pernye, a szilikapor, az őrölt kohósalak és a metakaolin. A szilikapor szilícium-dioxid (silica fume, microsilica, SF), amely a szilícium és szilíciumötvözetek, pl. a nagy tisztaságú ferro-szilícium gyártása során keletkező melléktermék. Ebben a folyamatban a nagy tisztaságú kvarc szilíciumra redukálódik magas hőmérsékleten, amely szilícium-dioxid gőzöket eredményez. Ezek a gőzök oxidálódnak, majd az alacsony hőmérsékletű zónában kondenzálódnak, mint szilika füstként is ismert apró részecskék [20].

A pernye (fly ash, FA) finom szilárd hamu, amely a porított szén égetése során keletkezik az erőművekben. Az égetési hőmérséklet függvényében a keletkező anyagban nő az amorf, üveges fázis aránya. A pernyét szilikaporral kombinálva a savas támadással szembeni ellenálló képességet eredményez [21,22]. A metakaolin az aluminoszilikátok csoportjába tartozó agyagásvány, amelyet a kaolin agyagásvány termikus aktiválásával állítanak elő. Szilikátkémiai jele: AS_2 (sztöchiometriai képlete: $Al_2Si_2O_7$ vagy $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). A metakaolin puccolános tulajdonságokkal rendelkező cement kiegészítő anyag. A kiegészítő anyagokkal a beton tömörsége nem csupán a legtömörebb illeszkedés megvalósításával fokozható, hanem a puccolános aktivitásukkal is. A puccolános reakcióban az amorf szíliciumdioxid a cementhidratáció során keletkező kalcium-hidroxiddal reagálva kalcium-szilikát-hidrát (CSH) gélt hoz létre, a következő egyenlet szerint (2) [23]:

$$SiO_2(\text{solid}) + Ca^{2+} + 2OH^- \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O \text{ (CSH gél)} \quad (2)$$

A kalcium-szilikát-hidrátok (CSH) a beton szilárdság hordozó fázisai. Egyrészt növelik a tapadást a cementkő és az adalékanyag szemcsék között, másrészt javítják a beton nyomószilárdságát és vegyi ellenállóképességét. A puccolános reakcióban keletkező többlet CSH jobban ellenáll az agresszív vegyi hatásnak, mint a portlandit (CH). Ez azt is jelenti, hogy a puccolános természetű cementkiegészítő anyagok használata olyan tömörebb betont eredményez, amelyben kalcium-hidroxid mennyisége (koncentrációja) kisebb, ezáltal jelentősen növelve a savállóságot.

A vasgyártásban keletkező nagyolvasztói salak szintén jelentősen növeli a beton tartósságát [24]. A kohósalak a portlandcement klinkerrel történő együttőrléssel kerül a kohósalak portlandcementbe vagy kohósalak cementbe [25]. A kohósalak hatékony kiegészítőanyag a kloridionok és a szulfátionok hatása ellen; ez azonban nem jelent számottevő javulást a savállóságban [26]. Ennek oka valószínűleg az, hogy a látens hidraulikus tulajdonságú kohósalak nem változtatja meg jelentősen a kalcium-hidroxid mennyiségét a betonban. Azonban figyelembe kell venni, hogy a cement termékek-

ben a klinker kohósalakkal történő helyettesítése mértékével csökken a hidratáció során keletkező $Ca(OH)_2$ mennyisége.

A cementkiegészítő anyagok adagolásának korlátja, hogy a puccolános reakció következményeként a cementkő lúgosságát, pH értékét csökkentik. A megfelelő pH érték (pH>9) biztosítása az acélbetét passzív állapotban tartásához elengedhetetlen. Az MSZ EN 206 szabványban [27] a k-érték elve előíró jellegű alapelv, amely alapelv egy kiválasztott cementet tartalmazó referencia beton tartóssági teljesítőképességének (vagy nyomószilárdságának) az összehasonlításán alapul olyan vizsgálati betonnal szemben, amelyben az adott cementet részben kiegészítő anyaggal helyettesítik a víz/cementtényező és a kiegészítő anyag tartalom függvényében.

3.2 Ellenállóképesség fokozása nagy teljesítőképességű betonnal

A nagy teljesítőképességű beton (high performance concrete, HPC) sokkal jobb tulajdonságokkal rendelkezik, mint egy közönséges beton [28]. Az olyan tulajdonságok, mint például a nagyobb szilárdság és a kisebb áteresztőképesség, a kémiai hatásokkal szemben is jobb ellenállóképességet eredményeznek. Az ilyen betonok nagyobb szilárdságát cementkiegészítő anyagokkal (pl. mikroszilika) érik el, és kis víz-kötőanyag tényezővel (0,25-0,40) készülnek [6]. A konzisztencia biztosítása miatt ezekben a betonokban nagy szerepe van az adalékszereknek [29]. A kisebb porozitás HPC-knek jelentős savállóságot biztosít. A megfelelően alacsony porozitást a kötőanyag mennyiségének növelésével, a víz-kötőanyag tényező (water to binder ratio, w/b) csökkentésével, a tömörséget fokozó inert kiegészítő anyagok alkalmazásával, adalékszerekkel és a megfelelő tömörítéssel érik el [30]. Az utókezelésnek is nagy jelentősége van.

4. NANOTECHNOLOGIA A SAVÁLLÓSÁG FOKOZÁSÁBAN

A nanotechnológia az anyagtudományok új ágát jelenti, amely elősegíti a nanorészecskék felhasználását különböző területeken. Amint a nevéből is nyilvánvaló, a nanorészecskék mérete a nanométer (10^{-9} m) mérettartományban található. A nanorészecske az, amelynek legalább egy mérete 10^{-9} mérettartományba esik [30]. A nanorészecskék tulajdonságai különböznek az anyag mikro- vagy makroszintű tulajdonságaitól. Például az inert titániumot (TiO_2) pigment célokra használják, míg a nanotitánia fotokatalitikus tulajdonságokkal rendelkezik. Ennek tudatában kísérleteket folytatnak arra nézve, hogy a nanotechnológiát az élet különböző területein alkalmazzanak, beleértve az építőmérnöki területeket is. A nanotechnológia fontosságát a beton elenállóképességének növelése is alátámasztja.

A szerkezeti anyagoknak nem csupán a szilárdsága, de a sűrűsége is egyike a legfontosabb tervezésben figyelembe vett tulajdonságoknak. A nagy teljesítőképességű beton igen hatékony a savas közeg támadásával szemben [28]. Azonban a nagy szilárdságú betonok általában nagyobb sűrűséggel jellemezhetőek, ami által a szerkezetek önsúlya nő. Másfelől azok a nanotechnológiás anyagok, amelyek nagyobb szilárdságúak, miközben kis vagy közepes anyagsűrűséggel rendelkeznek, nagy jelentőségűek lesznek a jövőben. Ilyen anyagok például a szén nanocsövek (carbon nanotubes, CNTs) és a szén nanoszálak (cabon nanofibres, CNFs) [32]. A vasbeton hidak tervezési élettartama nanotechnológia alkalmazásával jelentősen növelhető [33].

Az elmúlt években számos új cementkompozitot fejlesztettek ki a nano-titania (TiO_2), a szén nanocsövek, a nano-szilika (SiO_2), a nano agyag és a nano-alumínium-oxid (Al_2O_3) kombinációjával [34, 35]. A nano-kompozit cementkötésű anyagok mellett erőfeszítések folynak a nano-cement kereskedelmi bevezetésére is. A kereskedemben jelenleg kapható cementekben a részecskék mérete mikrométer tartományban van [6]. A nagyobb fajlagos felületű finomabb szemcseméretű (nano) részecskék hatékonyabban képesek betölteni a pórusokat a cementmátrixban, tömörítik annak szerkezetét, és a gyorsabb kémiai reakcióiknak köszönhetően nagyobb szilárdságot képesek kialakítani [36]. Más szóval a nano anyagok növelhetik a beton kémiai ellenállóképességét a savas környezettel szemben.

A nano-SiO_2-t tartalmazó beton áteresztőképessége (gáz, folyadék, ion mozgás) elegendően kismértékű ahhoz, hogy növelje a beton tartósságát és élettartamát [37]. A 15 nm ($15 \cdot 10^{-9}$ m) átlagos részecskeméretű nanoszilika 1,5% -os alkalmazása csökkentette a víz behatolási mélységét, valamint a gázáteresztő képességét és diffúziós mélységét [38]. A permeabilitási vizsgálat azt mutatta, hogy a nano-SiO_2 tartalmú beton kisebb vízáteresztő képességgel rendelkezik, mint a normál beton [39].

Reaktív nanorészecskéket elektrokinetikusan is be lehet építeni a megszilárdult cementkőbe, a beton permeabilitásának csökkentésére. A kolloid nanorészecskéket szintetikusan előállított (beton)

pórusoldatba diszpergálták [40]. Nanoszilika (SiO_2, 20 nm-es méret) és nanoalumina (Al_2O_3, 2 nm-es méretű) részecskéket használtak. Megfigyelték, hogy az 5 perces kezelés 5 V egyenfeszültség felhasználásával, 0,15 m-es távolságban alkalmazva, elegendő ahhoz, hogy a nanorészecskéket a cementkő pórusrendszerbe vezesse. A módszer alkalmazásával a cementpépek permeabilitási együtthatója 1-3 nagyságrenddel csökkent.

A nanotechnológia segítségével olyan molekulaszerkezetű bevonatokat hoztak létre, amelyek egyszerűen elutasítják az idegen anyagok tapadását. Számos nanobevonat elérhető a piacon, amelyek ellensúlyozzák a savas környezet hatását, és amelyek hatékony kiegészítői lehetnek az elsődleges védelemnek [41].

A nano-adalékszerekkel kapcsolatos új betonokat fejlesztettek az Egyesült Államok Nemzeti Szabványügyi és Technológiai Intézetében (NIST, USA) [42]. A betontechnológiában alkalmazható nano-adalékanyagot viszkozitást növelő – diffúziót csökkentő anyagnak (Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology, VERDiCT) nevezték el. A nano-adalékszerek által a beton pórusaiban növelhető a beton pórusoldatának viszkozitása, amivel jelentősen lassítható a külső hatások (köztük a savak) behatolása. Az olyan kritikus alkalmazási területeken, mint az infrastruktúra és a nukleáris hulladék hosszú időtartamú tárolásával összefüggő műtárgyak, a nanotechnológiás anyaggal kívánják elérni a beton hosszabb élettartamával kapcsolatos elvárásokat.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben röviden összefoglaltuk, hogy a beton savas környezettel szembeni ellenállóképessége milyen anyagokkal és módszerekkel növelhető. Hangsúlyt kaptak a savas környezet kialakulásának okai. A beton savas közeggel szembeni ellenállóképességének fokozása elsősorban a beton belső szerkezetének javításával, betontechnológiai módszerekkel érhető el, amely az elsődleges védelem része. Ebben jelentős szerepe van a puccolános jellegű cement kiegészítő anyagok alkalmazásának is. A nagy teljesítőképességű betonokban a kiegészítő anyagok alkalmazásán túl jelentős szerepe van a kis víz-kötőanyag tényezőnek, valamint a nagy hatású adalékszereknek is. A saválló bevonatok alkalmazása a másodlagos védelem. Ezen kívül említést tettünk azokról az új nanotechnológiás anyagokról is, amelyek a savállóságra vonatkozó célok elérését szolgálhatják.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

HIVATKOZÁSOK

[1] T. Nochaiya, W. Wongkeo, A. Chaipanich, “Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete”, Fuel, Vol. 89(3), pp. 768-774, 2010.
[2] R.D. Woodson, “Concrete Structures: Protection, Repair and Rehabilitation”, ISBN 1856175499, 9781856175494, Butterworth-Heinemann, 2009.
[3] J.F. Lamond, J.H. Pielert, “Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials”, ASTM International, 2006.
[4] E. Poulsen, “Diffusion of Chloride in Concrete - Theory and Application”, ISBN 0419253009, 9780419253006, Taylor & Francis, 2005.
[5] X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong, “Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview”, Construction and Building Materials, Vol. 30, pp. 125-138, 2012.
[6] A.M. Neville, “Properties of Concrete,” ISBN: 0273755803, 9780273755807, Pearson Education, 2011.
[7] P.C. Varghese, “Building materials”, PHI Learning, New Delhi, 2010.
[8] M. Liang, R. Huang, S. Fang, “Carbonation service life prediction of existing concrete viaduct/bridge using time-dependent reliability analysis”, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 21(1), pp.94-104, 2013.
[9] Yamanaka, T., Aso, I., Togashi, S., Tanigawa, M., Shoji, K., Watanabe, T., Suzuki, H. (2002), “Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth”, Water Research, Vol.36 (10), pp. 2636-2642. http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00473-0

[10] Ayoub, G. M., Azar, N., Fadel, M. E., Hamad, B. (2004), "Assessment of hydrogen sulphide corrosion of cementitious sewer pipes: a case study", Urban Water Journal, Vol.1 (1), pp. 39-53. http://dx.doi.org/10.1080/15730620410001732062
[11] Fan, C. Y., Field, R., Pisano, W. C., Barsanti, J., Joyce, J. J., Sorenson, H. (2001), "Sewer and tank flushing for sediment, corrosion, and pollution control", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.127 (3), pp. 194-201.http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:3(194)
[12] Jiang, G., Zhou, M., Chiu, T. H., Sun, X., Keller, J., Bond, P. L. (2016), „Wastewater Enhanced Microbial Corrosion of Concrete Sewers", Environmental Science & Technology. http://dx.doi.org/ 10.1021/acs.est.6b02093
[13] Liu, S. X. (2007), „Food and agricultural wastewater utilization and treatment", Blackwell Publishing, Iowa, USA, p.296.
[14] Alexander, M., Bertron, A., De Belie, N. (2013), „Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments", State of art report- RILEM TC 211 – PAE, http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3
[15] Guide, C. D. (1992), „Durable concrete structures", Comite Euro-International du Beton. Thomas Telford. 1992.
[16] J. Kenkel, "Basic Chemistry Concepts and Exercises", CRC Press, 2011.
[17] C. Shi, Y.L. Mo, "High-Performance Construction Materials Sciences and Applications," World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2008.
[18] E.K. Attiogbe, S.H. Rizkalla, "Response of Concrete to Sulfuric Acid Attack", ACI Materials Journal, pp. 481-488, Nov-Dec 1988.
[19] R.D. Woodson, "Concrete Structures: Protection, Repair and Rehabilitation", ISBN 1856175499, 9781856175494, Butterworth-Heinemann, 2009.
[20] D. Whiting, "Silica fume concrete for bridge decks", Transportation Research Board, 1998.
[21] V. Sata, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete", Construct. Build. Mater. Vol. 21(7), pp. 1589–1598, 2007.
[22] ASTM C618 - 12a, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", 2012.
[23] B.W. Langan, K. Weng, M.A. Ward, "Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement", Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1045-1051, 2002.
[24] http://www.nationalslag.org/blastfurnace.htm
[25] A.M. Neville, "Concrete Technology", Pearson Education Ltd, 2012.
[26] R. Snellings, G. Mertens, J. Elsen, "Supplementary cementitious materials", Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Vol. 74, pp. 211–278, 2012.
[27] MSZ EN 206:2014. Beton. Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség.
[28] P. Aïtcin, "High Performance Concrete", Taylor & Francis, 2011.
[29] A. Wypych, "Plasticizers Databook", Elsevier, 2013.
[30] A. M. Neville, "Concrete Technology", Pearson Education Ltd, 2012.
[31] A. Khitab, M. Qureshi, M. Nadeem, "Nano Engineered Building Products", International Conference on Engineering and Applied Sciences, 24-27 July, Beijing, China, 2012.
[32] K. Gopalakrishnan, "Nanotechnology in Civil Infrastructure: A Paradigm Shift", ISBN: 3642166563, 9783642166563, Springer, USA, 2011.
[33] www.nanoandme.org/nano-products/paints-and-coatings/
[34] G. Hüsken, M. Hunger, H. Brouwers, "Experimental study, photocatalytic concrete products for air purification," Building and Environment, Vol. 44 (12), pp. 2463-2474, December 2009.
[35] Z. Li, "Advanced Concrete Technology", ISBN: 047043743X, 9780470437438, John Wiley & Sons, 2011.
[36] L. Raki, J. Beaudoin, R. Alizadeh, J. Makar, and T. Sato, "Cement and Concrete, Nanoscience and Nanotechnology – Review", Materials, Vol. 3, pp.918-942, 2010.
[37] Sobolev, K., and M. Ferrada-Gutiérrez. "How Nanotechnology Can Change the Concrete World." American Ceramic Society Bulletin, No. 10, 2005, pp. 14–17.
[38] Wagner, J. P., and Hauck, H. G. (1994). "Nanosilica - an additive for high-strength concrete." Wiss. Zeitschrift - Hochschule füer Architektur und Bauwesen Weimar - Universität, 40, pp. 183-187
[39] Ji, T. "Preliminary Study on the Water Permeability and Microstructure of Concrete Incorporating Nano-SiO_2." Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 10, 2005, pp. 1943–1947.
[40] Cardenas, H. E., and L. J. Struble. "Electrokinetic Nanoparticle Treatment of Hardened Cement Paste for Reduction of Permeability." Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 4, 2006, pp. 554–560.
[41] "Nanotechnology for Simple, successful concrete repair: A specifiers Guide." available at http://www.basf-cc.com.au/sitecollectiondocuments/basf_nanocrete_24xa4_aus_ebook.pdf
[42] L. Triandafilou, "Strengthening concrete with nanoparticles", FHWA Resource Center, Baltimore, 2009.

FIB Conference: Sustainable Concrete: Materials and Structures IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **442** (2018) 012006 doi:10.1088/1757-899X/442/1/012006

Self-compacting concrete produced with limestone waste

K Kopecskó

Budapest University of Technology and Economics, Hungary

E-mail: kopecsko.katalin@epito.bme.hu

Abstract. The aim of the research was to design powder type self-compacting concrete containing high amount of limestone quarry waste as aggregate and fines. The light colour aggregate mixed with white cement resulted in esthetical surfaces of exposed concrete for architectural purposes. Large amount waste originated from the limestone mining process requires deposition with further treatment. In our study we tried to replace also the limestone powder fines by the slurry produced during the cut of limestone blocks. Seven recipes were examined during the research: three mixtures of quartz aggregate with different particle size distributions were used as reference mixtures, three mixtures composed of crushed limestone aggregate and one with mixed quartz-limestone composition, respectively. In the recipe of mixed limestone-quartz aggregate dried quarry waste slurry was successfully applied instead of direct ground limestone powder. In the research different test methods were used to determine the fresh properties as well as the hardened properties of concretes.

Keywords: self-compacting concrete, limestone waste, chloride ion migration

1. Introduction

The nature of mining processes creates a potential negative impact on the environment both during the mining operations and after the mine is closed. The limestone mining in Hungary dating back to Roman times, has been to present a number of operating mines and surface engineering to pursue stone processing. The mining and processing of limestone results in large amount of unusable stone blocks and also wet limestone cutting slurry, which are considered as mining waste and requires deposition with further treatment. It is important to use the excavated limestone to the greatest extent minimizing the debris have permanently disposed of, and positioned as a mining waste, thereby further reducing the environmental impact, the landscape damaging effect [1]. Reuse of these materials may reduce the environmental impacts.

Self-compacting concrete (SCC) is a type of structural concrete which strongly deviates from ordinary concrete in the fresh state, as it de-aerates and flows without the application of additional compaction energy [2]. The definition of self-compacting concrete (SCC) was described by Ozawa et al. [3], then Okamura and Ozawa [4]. We can distinguish the powder type and the stabilizer type self-compacting concretes. The main difference in composition between normal concrete and powder type SCC is the use of higher amount of fines in SCC to reach the suitable, approximately 30% higher amount of paste content which ensures the high fluidity in fresh state. Application of fines is necessary in order to prevent bleeding and segregation. Direct ground limestone powder is well suited additional material for SCCs. Quarry waste limestone slurry could replace the limestone powder products in concrete decreasing the material and energy consumption.

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.
Published under licence by IOP Publishing Ltd

The aim of the present research was to design powder type SCC containing high amount of limestone waste for architectural purposes (e.g. facades, street furniture).

2. Experimental programme

In the mix design we have followed the Okamura method [5] which is based on a three-fold approach considering the paste, mortar and concrete phases [2]. In figure 1 the volume fractions are given for these phases.

In the Okamura method paste, mortar and concrete phases are distinguished and the desired volume ratios are given for these phases:

- estimation of air content, usually 2-3 vol% (V_{air});
- limitation of the coarse aggregate content (4-16 mm) in 50 vol%, then to determine the mortar volume ($V_{mortar} = V_{concrete} - V_{air} - V_{aggr,4/16}$);
- limitation of fine aggregate content (0-4 mm) in the mortar phase in 40 vol%, then to determine the paste volume ($V_{paste} = V_{mortar} - V_{aggr,0/4} = V_{water} + V_{powder}$);
- determine the composition of the paste volume by defining the volume ratio of filler and cement (V_{filler}/V_{cement}), experimentally measuring the water demand of the powder (cement-filler), mix β_{powder}, calculating the necessary water content ($V_{water} = V_{paste} \cdot \beta_{powder}$) and powder content ($V_{powder} = V_{paste} - V_{water}$);
- experimental optimization of the resulting phases (paste, mortar and concrete).

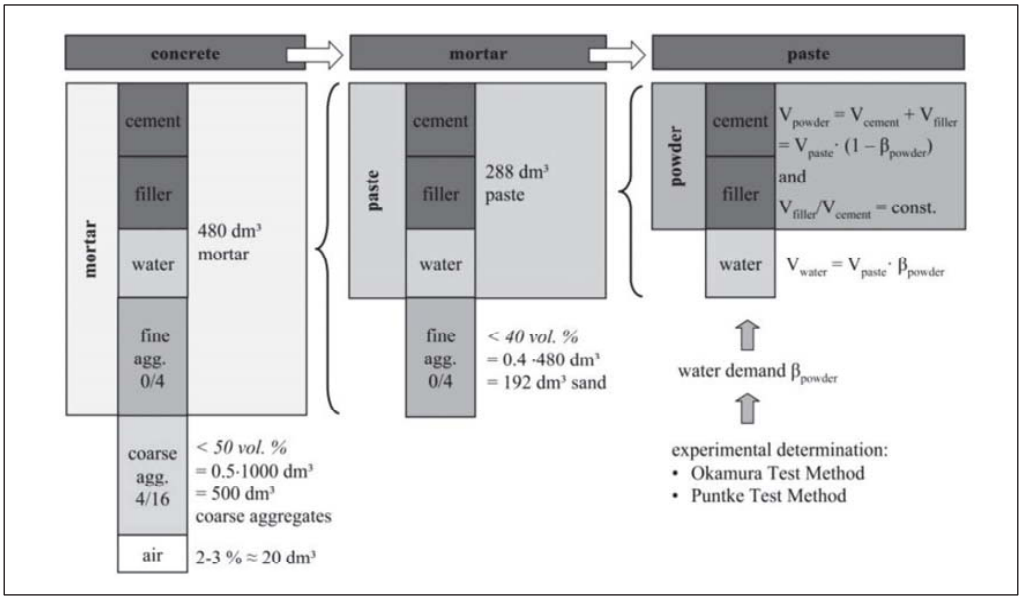


Figure 1. Mix-design concept for self-compacting concrete according to Okamura et al. [5] (source of figure: *fib* Bulletin No. 51 [2], courtesy of *fib*).

In our mix design the limitations for concrete volume fractions (coarse aggregate 4/16 < 50 vol %) were not taken into account because in the mixtures 4 mm maximum grain size of aggregate (d_{max}) was chosen. It means that in our case the fine aggregate content was equal with the total aggregate content. Instead of the difficult determination of water demand (β_{powder}) the water/cement ratio was chosen 0.45 based on the result of the trial mixing.

Seven mixtures of self-compacting concrete were studied during the research. Three basic recipes were designed with different particle size distributions of the coarser aggregate, where the fractions of 1/2 and 2/4 mm varied in different ratios (25:75, 35:65 and 45:55). Three mixtures were made with quartz aggregate (K1-K3, used as reference), further three mixtures were made with crushed limestone

aggregate fractions of 1/2 and 2/4 mm (M1-M3). Based on the results one recipe was selected for mixed quartz-limestone composition (MK). The origin of the limestone is the freshwater limestone quarry Süttő (Hungary). Crushed aggregate fractions were produced in the laboratory conditions.
Proposed by Daczko [6] in the mix design the 0/0,125 fraction of fine quartz sand was added to the paste phase (i.e. paste volume).

To keep the consistency and workability high performance superplasticizer admixture was applied. The amount of cement, limestone powder, fine sand (0/0.125 mm) and the total amount of the aggregate was constant for all recipes. The type of cement used in the experiment is CEM I 52,5 N white cement. The type and amount of polypropylene microfiber was the same in all recipes (0.1 vol%).

In the studied mixtures the aggregate fractions of 1/2 and 2/4 mm varied in different mass ratios:

- 25:75 in the mixtures K1 and M1;
- 35:65 in the mixtures K2, M2 and MK;
- 45:55 in the mixtures K3 and M3.

The volume fraction of fine aggregate (1/4 mm) for all mixtures was approximately 42 vol% (table 1).

Table 1. Recipe of the mixture K1 (aggregate 1/2 and 2/4 mm fractions in the ratios of 25:75).

Material	Type or fraction	Density (kg/m^3)	Mass (kg)	Volume (l)	Mass/mix (kg/60 l)
Cement	CEM I 52,5 N white	3100	400	129.0	24.0
Limestone powder	commercial	2700	450	166.7	27.0
Fine sand	0/0.125 mm		216	81.5	13.0
	1/2 mm (25%)	2650	284	107.2	17.0
Sand	2/4 mm (75%)		850	320.8	51.0
	Sum of sand (100%)		1134	427.9	68.0
Microfiber	Fibrofor Multi	910	0,9	1.0	0.054
Admixture	ViscoCrete 20HE (2.5%)	1090	10	9.2	0.600
Water	m_w/m_c=0.45	1000	180	180	10.8
Air		-	-	5	-
Sum			2391	1000	

Commercial ground limestone powder was applied as fines (filler), except in the recipe of mixed quartz-limestone aggregate (MK), where dried quarry waste slurry was utilized. The quarry waste slurry was produced during the cut of the large limestone blocks, and it is available in large amount. The specific surface of the fines was measured by Blaine method. The specific surface of limestone waste slurry was close to the specific surface of the white cement, and higher than for the commercial limestone powder (table 2).

Table 2. Specific surface of fines

	CEM I 52.5 N	Limestone powder	Limestone slurry
Specific surface (m^2/kg)	417	343	407

The trial mixtures were made with quartz aggregate. In case of limestone aggregate the consistency and the workability was not appropriate with the same amount of mixing water because of the porosity resulting water uptake. To reach the same consistency first we measured the 30 minutes water uptake

(4.8 m%) of the porous crushed aggregate. Before mixing the different concrete mixtures the limestone aggregate was mixed with the necessary water demand and kept to saturate for 30 minutes in the mixer. Without this treatment exclusively the increase of amount of admixture did not result adequate consistency and workability.

3. Results and Discussion

In the study various test methods were used to determine both the fresh properties (e.g. slump-flow test, T50 time, J-ring test, loss of consistency) of concrete mixtures as well as the hardened properties of concrete specimens at different ages (compressive strength, flexural tensile strength, modulus of elasticity, abrasion resistance, freeze-thaw resistance).

3.1. Fresh properties of concrete mixtures

Studying the fresh properties of self-compacting concrete has a great importance. All recipes resulted in self-consolidating, self-compacting concrete (table 3).

3.1.1. Slump-flow test, Visual Stability Index and J-ring test

As we expected specimens with limestone aggregate reached lower values of compressive and flexural Slump-flow test according to the MSZ EN 12350-8 standard [7] was used to assess flowability and flow rate. The flow values of concretes K (quartz gravel) exceeded the size of the flowtable (80 cm), so these values were fixed to 80 cm uniformly. The flow values of limestone additive were slightly less, between 74 and 80 cm. This means that the shear-tension in the concrete mixtures made with quartz aggregate is smaller. According to the MSZ EN 206-9:2010 standard [8], all the tested concrete can be classified into the SF3 (760-850 mm) slump-flow class.

T_{50} times were uniformly above 2 seconds, which are to be classified into VS2. Comparing the T_{50} times, it can be seen that concrete mixtures made with quartz aggregate reached slower the 50 cm diameter than concrete mixtures made with limestone, which means that their plastic viscosity is higher. According to Daczko [6], the smaller viscosity is better for mixtures with smaller slump-flow value, so that they can fill the formwork and the space between the reinforcements properly. Otherwise, the filling ability of concrete is inadequate. However, in the case of concretes with higher slump-flow value, the higher plastic viscosity is appropriate.

The J-ring test can be used to determine the passing ability of self-consolidating concrete. The results of J-ring tests were significantly affected by the shelf life of the concrete. The passing abilities of limestone concretes were much better, with less than 5 cm for all three recipes. For the other recipes, the maximum difference in spread is the highest for concrete K3 (24 cm), which indicates a poor passing ability. The passing ability of MK (mixed quartz-limestone aggregate) recipe represents about the average with the 9 cm difference in spreading.

The stability of self-consolidating concrete can be observed visually by examining the concrete mass and therefore can be used for quality control of self-consolidating mixtures. Visual rating criteria were used to classify the ability of the self-compacting concrete mixtures to resist segregation (VSI, visual stability index). According to ASTM C 1611, after spreading of the concrete has stopped, visually inspect the concrete mixture by observing the distribution of the coarse aggregate within the concrete mass, the distribution of the mortar fraction particularly along the perimeter, and the bleeding characteristics. VSI is rating from 0 (highly stable: no evidence of segregation or bleeding) up to 3 (unstable: mixture without stability and bleeding) [9]. The results of measurements of fresh properties are summarized in table 3. Figures 2-5 shows the VSI of different mixtures.

3.1.2. Shelf life of concrete mixtures

The shelf life of concrete mixtures was also studied . At the age of 30 minutes the mixtures lost the self-compatible property: they showed rather slump than flow. The reason is the relative early setting of the CEM I 52,5 N white cement. However the drop of the efficacy of the admixture could also influence the shelf life and change the workability (table 4).

Table 3. Fresh properties of mixtures

	Q1	Q2	Q3	L1	L2	L3	QL
slump-flow test, k_t (cm)	>80	>80	>80	75	80	74	77
J-ring test, k_{tJ} (cm)	45	71	56	72	78	70	68
T_{50} time (s)	3.5	4.5	5.0	2.5	2.5	3.0	2.0
Visual stability index (VSI)	0	0	0	1.5	1	2	1



Figure 2. Spread of the Q2 mixture, VSI 0



Figure 3. Spread of the L3 mixture, VSI 0

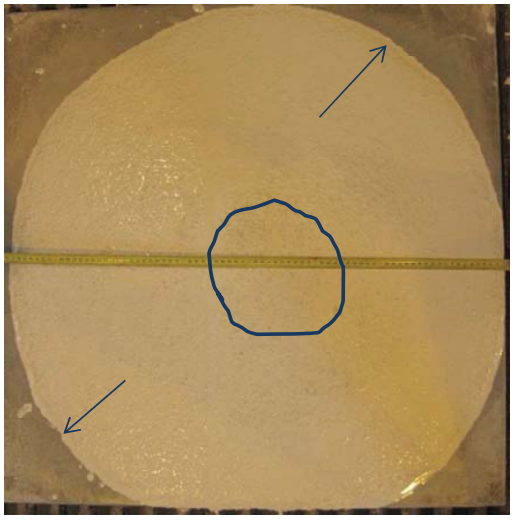


Figure 4. Spread of the QL mixture, VSI 1

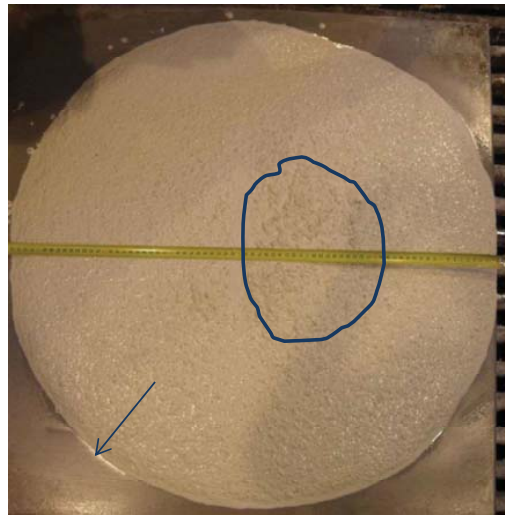


Figure 5. Spread of the L3 mixture, VSI 2

Table 4. Shelf life of the concrete mixtures

Haegermann spread	Q1	Q2	Q3	L1	M2	M3	QL
0 min. (cm)	30	28	28	28	26	27	25
15 min. (cm)	28	25	26	20	24	20	22
30 min. (cm)	10	11	11	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

3.1.3. Air content and density of concrete mixtures

The air content in the recipes of concrete with quartz aggregate was estimated to be 0.5 vol% (5 l/m^3), and for concretes made with limestone aggregate to be1.0 vol% (10 l/m^3). This was different from the proposed mix design where the air-void content estimated to be 2-3 vol %. Based on the test results of the air content, the Okamura's suggestion (2-3 vol% air content) can be realistically designed in SCC recipes. It is difficult to achieve lower air content with self-compacting concrete. Limestone additive concretes due to the angular shape and the coarser surface of the grains are able to keep more air content. Due to the round, smooth surface of quartz aggregates, the admixture is effective to drive out the adsorbed gas layer.

The densities of the fresh concrete mixtures varied between 2250 and 2370 kg/m^3, the prepared concretes can be considered as concretes with ordinary density, however slightly less than for conventional concretes with quartz aggregate (without addition of large amount of limestone filler). The density of hardened concrete was measured at the age of 28 days (table 5).

Table 5. Air contents and densities of fresh and hardened concrete

	K1	K2	K3	M1	M2	M3	MK
Air content (vol%)	1.42	1.58	2.04	2.89	2.88	4.36	2.66
Density of fresh concrete (kg/m^3)	2368	2365	2354	2275	2280	2250	2282
Density of hardened concrete (kg/m^3)	2365	2363	2346	2235	2246	2227	2275

3.2. Hardened properties of concrete mixtures

3.2.1. Strength and modulus of elasticity

The compressive and flexural tensile strength values were determined on 40·40·160 mm prisms (figures 6 and 7) as well as the compressive strength was determined on cubes of 150 mm (figure 8). As we expected specimens with limestone aggregate reached lower values of compressive and flexural tensile strength than concrete with quartz aggregate. The average compressive strengths of quartz containing mixtures (K1-K3) at the age of 28 days were above 80 MPa; mixtures with limestone aggregate (M1-M3) shown about 35% smaller compressive strength as well as mixture with mixed aggregate (MK) about 20% smaller.

The moduli of elasticity of quartz containing mixtures (K1-K3) are greater than 35,000 MPa; in case of mixtures with limestone aggregate (M1-M3) are below 30,000 MPa and for mixed aggregate concrete (MK) is 33,400 MPa.

3.2.2. Abrasion resistance

The abrasion resistance was determined according to the standard MSZ EN 14157:2005 [10]. For the test the Böhme abrasion wheel tester was used. The aggregate properties affect the performance of concrete. Based on the test results mixtures containing limestone aggregate (M1-M3) are not considered abrasion resistant. This is the consequence of the different hardness of the minerals. Surface hardness of aggregates is important where aggregates are likely to wear in service. The Mohs'

relative hardness of calcite ($CaCO_3$) is 3 while the Mohs' relative hardness of α-quartz (α-SiO_2) is 7 [11]. The abrasion resistance of the mixture MK improved by the application mixed quartz-limestone aggregate (figure 9).

3.2.3. Freeze-thaw resistance

Mixtures containing limestone aggregate (M1-M3) in terms of freeze-thaw resistance also performed worse than concretes containing quartz aggregate. The frost resistance test carried out in deionised water at 50 cycles. After removing the specimens the residual compressive strength was determined. The most significant decrease in compressive strength was measured in case of concrete containing mixed aggregate (MK), with an average decrease of 15 MPa (21%); the decrease in average compressive strength of concrete made with aggregate quartz aggregate is 5.00 MPa (5.8%) and for concrete made with limestone aggregate is 3.40 MPa (5.2%). Based on the results of the salt scaling tests concretes without quartz aggregate (M1-M3) are not suggested for applications required use of de-icing salt in winter.

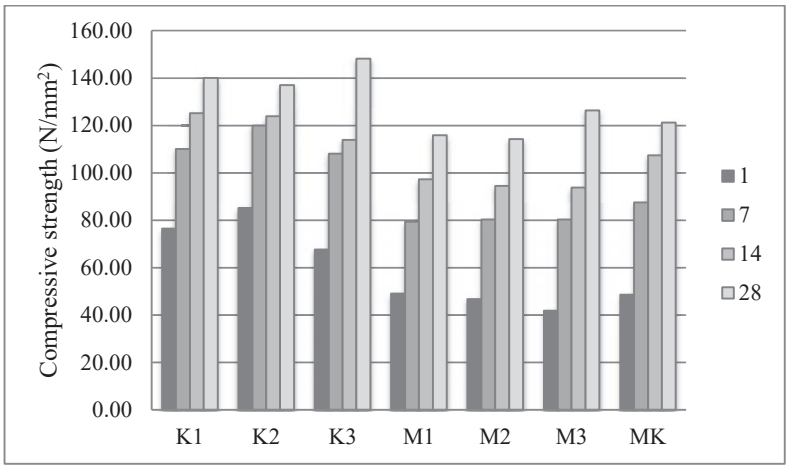


Figure 6. Development of compressive strength of SCC mixtures determined on prisms

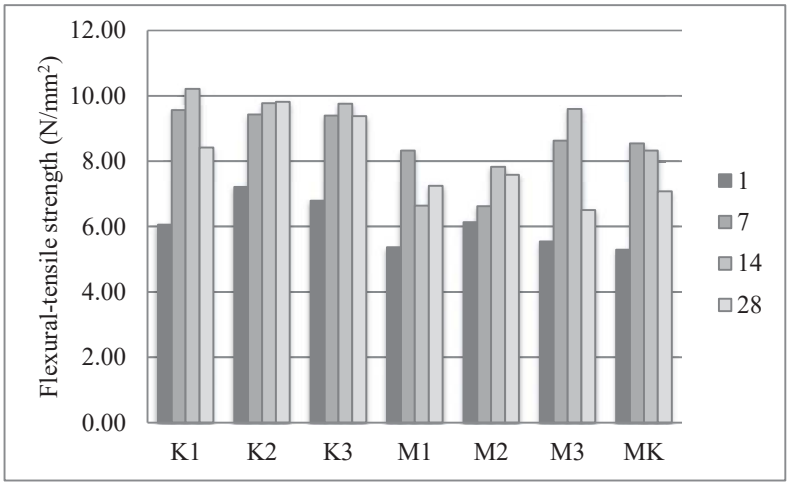
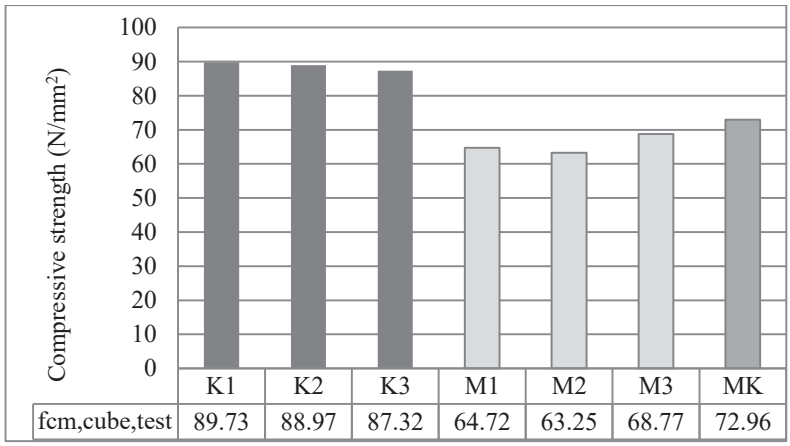


Figure 7. Development of flexural-tensile strength of SCC mixtures determined on prisms



	K1	K2	K3	M1	M2	M3	MK
fcm,cube,test	89.73	88.97	87.32	64.72	63.25	68.77	72.96

Figure 8. Compressive strength of SCC mixtures at the age of 28 days, determined on cubes

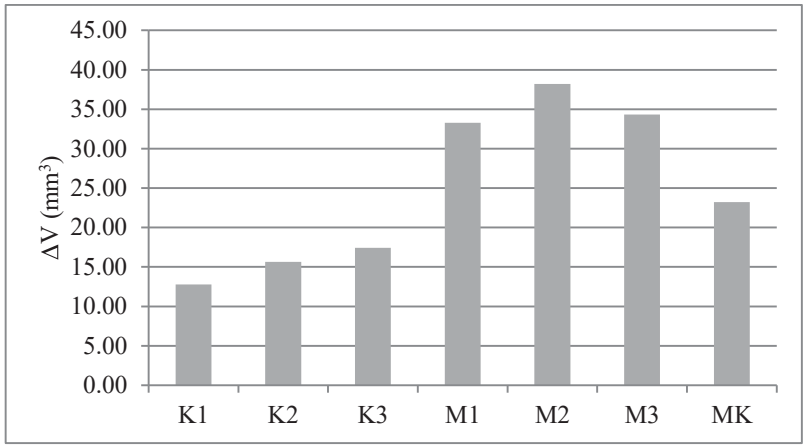


Figure 9. Abrasion resistance of SCC mixtures at the age of 28 days, decrease of volume (mm^3)

3.2.4. Chloride ion migration

Tang and Nilsson [12] developed a rapid electrical migration (HTC) method to determine the diffusion coefficient of chloride ions and the degree of chloride penetration. The method was further developed in NT Build 492 [13]. For the experiment, discs with 50±2 mm height were cut from the Ø100x200 mm cylinders (figure 10). The test started at the age of 28 days. For the comparative test all specimens were subjected to the 30 V DC for the same time (8 hours). After the measurement, the specimen has to be splitted and then the split surface is treated with silver nitrate ($AgNO_3$) solution for the colorimetric determination of the depth of chloride penetration. Figures 11 and 12 shows pictures after the whitish precipitation (AgCl) occurred during the reaction between $AgNO_3$ and Cl^- ions.

In specimens made with quartz aggregate, the chloride penetration depth as well as the nonsteady-state migration coefficient was much smaller than in specimens made of limestone additives. The depth of chloride penetration depends on the permeability concrete (i.e. pore structure). The porosity of the limestone aggregate increases the permeability. It can be noticed that among the three discs of one specimen, the disc number 2 (i.e. the middle of the cylindrical specimen) has the largest value of penetration depths or migration coefficients. This can be explained by the self-compacting properties of concrete. In case of SCC there is no vibration, so the upper third is richer in the paste phase, while the lower third is denser due to the more aggregate grains.

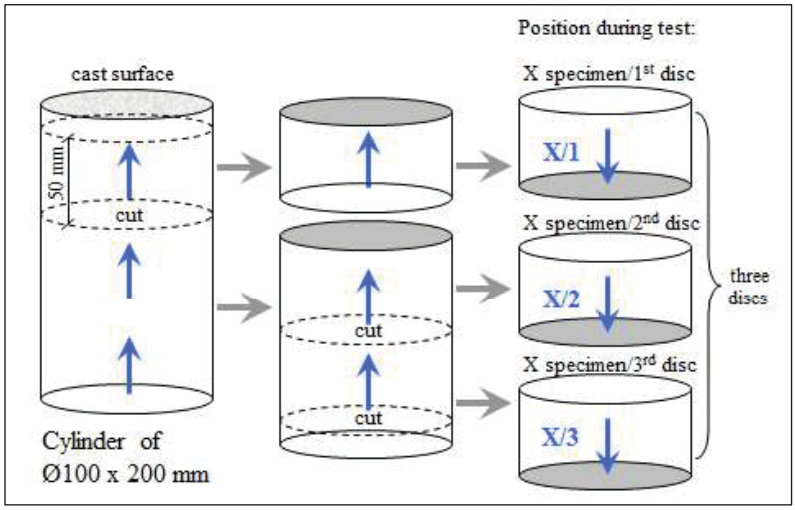


Figure 10. Preparation of specimens (discs) for testing chloride migration

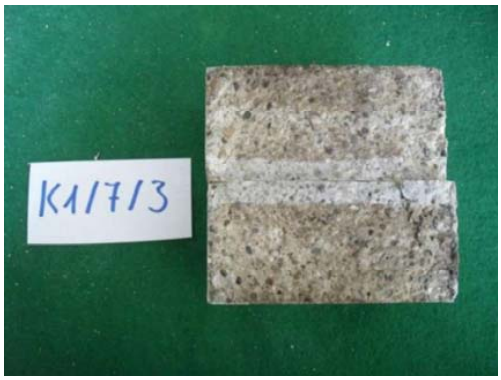


Figure 11. White precipitation of AgCl shows the depth of chloride ingress, mixture K1

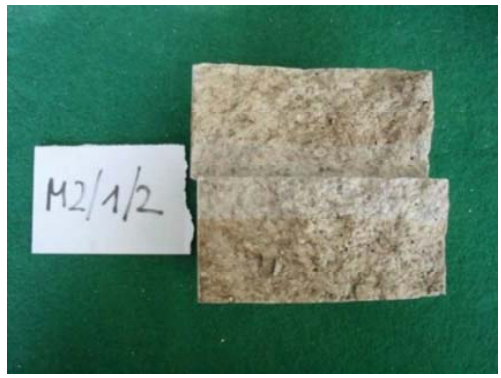


Figure 12. White precipitation of AgCl shows the depth of chloride ingress, mixture M2

4. Conclusions

The aim of the present research was to design powder type SCC containing high amount of limestone waste for architectural purposes (urban furniture, cladding, etc.). The origin of the limestone is the freshwater limestone quarry Süttő (Hungary). Aggregate fractions were made crushing of the freshwater limestone in laboratory scale. Seven recipes were examined during the research: three mixtures of quartz aggregate with different particle size distributions were used as reference mixtures, three mixtures composed of crushed limestone aggregate and one further with mixed quartz-limestone composition. Based on the test results the recipe of self-compacting concrete containing combination of quartz-limestone aggregate (MK) was suggested to use in precast concrete industry. In the recipes of K1-K3 and M1-M3 commercial ground limestone powder was used as fines. In the recipe of mixed quartz-limestone aggregate (MK), instead of commercial ground limestone powder the waste limestone slurry was successfully applied. Limestone slurry is a waste material, which is produced during cut the large limestone blocks. This concrete has increased resistance against abrasion comparing with concretes containing only limestone aggregate. With the proposed concrete mixture the purpose of containing the largest possible amount of limestone waste in a self-compacting concrete with appropriate fresh and hardened properties was achieved.

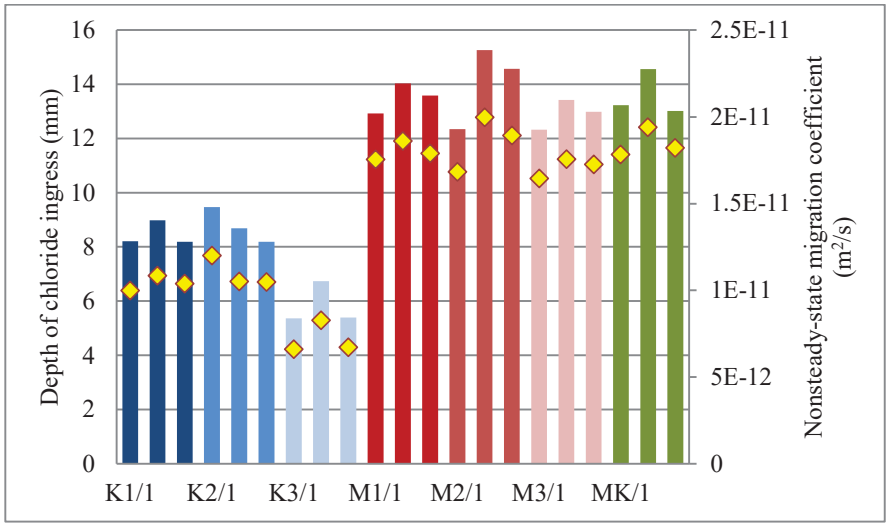


Figure 13. Depths of chloride ingress (mm) and nonsteady-state migration coefficients (m^2/s) of SCC mixtures at the age of 28 days (migration test by 30 V DC, 8 hours).

Acknowledgements

Author acknowledges the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

References

[1] Mang B 2004 Az ásványi nyersanyagtermelés főbb hatásai (in English: The impact of mineral raw material production), *Publication of the University of Miskolc*, Series A, Mining, Vol. 66, pp. 15-21.

[2] *fib* Bulletin No. 51. 2009 Structural concrete. *Textbook on behaviour, design and performance*, Vol. 1. pp. 96-99.

[3] Ozawa K, Maekawa K and Okamura H 1990 High performance concrete with high filling capacity, *Admixtures for concrete, improvement of properties*, Vasquez E (Ed.), Chapman & Hall, London, Great Britain, pp. 51-62.

[4] Okamura H and Ozawa K 1996 Self compactable high performance concrete in Japan, *High performance concrete*, Zia P (Ed.), SP-159, ACI, Farmington Hills, USA, pp. 31-44.

[5] Okamura H and Ozawa K 1995 Mix design for self-compacting concrete, *Concrete Library of JSCE*, Vol. 25, No. 6, pp. 107-120.

[6] Daczko J A 2012 Self-consolidating concrete – Applying what we know, *Spoon Press*, Abingdon, pp. 118-137.

[7] MSZ EN 12350-8:2010. Testing fresh concrete. Part 8: Self-compacting concrete. Slump-flow test.

[8] MSZ EN 206-9:2010. Concrete. Additional rules for self-compacting concrete (SCC).

[9] ASTM C1611 / C1611M – 14 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.

[10] MSZ EN 14157:2005. Natural stone test methods. Determination of the abrasion resistance.

[11] http://webmineral.com/help/Hardness.shtml#.WqAo5nxG2Cg. Downloading date: 01/02/2018, search engine: google.hu, search terms: Mineral hardness.

[12] Tang L and Nilsson L 1992 Chloride diffusivity in high strength concrete, *Nordic Concrete Research*, Vol. 11, pp. 162-170.

[13] Nordtest NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Approved 1999-11, Finland.

CT ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI AZ ÉPÍTŐANYAGOK VIZSGÁLATÁNÁL







VASBETONÉPÍTÉS • 2018/4

DOI: 10.32969/VB.2018.4.3

Dr. Majorosné Lublóy Éva Eszter – Dr. Balázs L. György – Földes Tamás – Dr. Kapitány Kristóf – Hlavicka Viktor

Az építőanyagok belső szerkezetének ismerete számunkra nagyon fontos, hiszen az anyagok tulajdonságait és tartósságát az nagymértékben befolyásolja. Az anyagok belső szerkezete sok kiegészítő információt tartalmaz, melynek vizsgálata analitikai módszerekkel csak részben lenne lehetséges.

A komputertomográfiás (CT) felvételeken a vizsgálat tárgya szeletekre bontva látható. Az adatmátrixból előállított kép tulajdonképpen egy sűrűségtérkép az adott anyagokról. Ezen sűrűségképen jól kirajzolódnak a vizsgált tárgy különböző sűrűségű elemei, ezáltal különböző sűrűségű összetevői is azonosíthatóak. A szeletek egymás utáni lejátszásával gyakorlatilag bele láthatunk az anyag szerkezetébe, de három dimenzióban is ábrázolhatjuk a vizsgált anyagot.

A cikk keretein belül szeretnénk áttekinteni, hogy a CT vizsgálatok hogyan lehetnek célszerűen használhatóak az építőanyagok vizsgálatai során.

Kulcsszavak: anyagvizsgálat, CT, anyagszerkezet, roncsolásmentes vizsgálat

1. BEVEZETÉS

Az építőanyagok kis léptékű (mm) térbeli belső felépítéséről nehéz megbízható módon, roncsolásmentesen képet alkotni. Optikai vagy elektron mikroszkóppal roncsolásmentes módon csak felületi kép készíthető. Hagyományos módszerekkel a minta felszeletelése után lehetőség van egy-egy vékony szeletről további képek felvételére is, de ez meglehetősen időigényes, és a szeletek elkészítésekor megváltozhat a minta belső szerkezete, így a háromdimenziós eredeti belső szerkezetre a legtöbb esetben nehéz megbízható módon következtetést levonni. A hagyományos röntgenképek tartalmazzák a teljes háromdimenziós belső szerkezet vetületi képét, azonban ilyen felvételekből nem nyerhető ki a valós háromdimenziós szerkezet. A számítógépes tomográfiával (X-ray computed tomography, CT) lehetővé válik a teljes három-dimenziós belső szerkezetről a képalkotás anélkül, hogy szükség volna minta előkészítésre vagy kémiai fixálásra.

A komputertomográfiás (CT) felvételeken a vizsgálat tárgya szeletekre bontva látható. A CT adatmátrixból vizualizált kép első közelítésben úgy kezelhető, mint egy szeletfelbontásnak megfelelő sűrűségtérkép az adott anyagokról. Ezen sűrűség képen jól kirajzolódnak a vizsgált tárgy különböző összetevői (adalékanyag szemcsék, pórusok, repedések). A szeletek egymás utáni lejátszásával gyakorlatilag *beleláthatunk az anyag szerkezetébe*.

Az építőanyagok belső szerkezetének ismerete számunkra nagyon fontos, hiszen az anyagok tulajdonságait és tartósságát az nagymértékben befolyásolja. Ha az anyagok belső szerkezetébe belelátunk és ezáltal megismerjük, akkor sok kiegészítő információt kaphatunk, melyek vizsgálata analitikai módszerekkel csak részben lenne lehetséges.

A cikk keretein belül összefoglaljuk, hogy a CT-vizsgálatok hogyan lehetnek célszerűen használhatóak az építőanyagok vizsgálatai során.

2. A SZÁMÍTÓGÉPES TOMOGRÁFIA (CT) MŰKÖDÉSE

A szakirodalomban a CT-vizsgálat más néven számítógépes (komputer) tomográfia néven ismeretes, ami a *radiológiai diagnosztika* egyik ága. A tomográfia szó a szeletelésre utal. A tomográfiás felvételeken a vizsgálat tárgya képzeletbeli szeletekre bontva látható. A komputertomográfia a hagyományos röntgenátvilágítási technika továbbfejlesztése.

A CT-készülékek is röntgensugárzást használnak a felvételek elkészítéséhez, de a sugarak nem filmet exponálnak, hanem detektorok segítségével érzékelik a röntgensugarakat, majd a detektorokból nyert elektromos jelekből számítógép segítségével készül el a rekonstruált keresztmetszeti kép. A tomográfiás felvétel esetében vékony, síkszerű röntgensugárnyalábbal világítják át a vizsgált objektumot. Az objektum mögött elhelyezett detektor egy vonal mentén érzékeli, hogy a sugárnyalábból hol és mennyi nyelődött el. A sugárnyalábbal egy adott síkban több irányból is átvilágítják a testet, és a mért intenzitásgörbékből kibontakozik az adott síkban (szeletben) elhelyezkedő részletek rajza. A síkot ezután arrébb tolják, és újra körbeforgatják. Az eljárás befejeztével a vizsgált test térbeli szerkezete feltérképezhető. „Szerkezeten" itt a röntgensugár áteresztő képesség szempontjából megkülönböztethető részletek, vagyis a különböző sűrűségű anyagok elrendeződése értendő *(Berényi, Bogner, Horváth, Repa, 1997)*.

A vizsgálat a szükséges számításokkal együtt néhány perc alatt elvégezhető (*Földes, 2011, Buzug, 2008)*. A teljes kiértékelés további jelentős feladatokat jelent.

A mérési módszer az anyagok eltérő sugárgyengítési tulajdonságain alapul. A μ sugárgyengítési együttható az anyagra jellemző tulajdonság, ami az anyag sűrűségétől és a röntgensugárzás spektrumától függ.

A CT felvételek minden egyes voxelje (térfogategysége)

egy-egy intenzitásértékkel rendelkezik, ami az adott térfogatelem relatív lineáris sugárgyengítését mutatja *(Russ, 2011*). A következő lépésben ezeket az értékeket egy skálához rendeljük az alábbi képlet alapján:

$$HU = \frac{K(\mu - \mu_{víz})}{\mu_{víz}},$$

ahol:

HU	a Hounsfield-egység (Hounsfield Unit) [-],
K	egy konstans, aminek az értéke 1000 [-],
μ	az adott képpont sugárgyengítési együtthatója,
$\mu_{víz}$	a víz sugárgyengítési együtthatója.

A skála fix pontjai a víz Hounsfield-értéke, ami 0-ra van felvéve, és a levegő Hounsfield-értéke, ami -1000 Hounsfield-egység. A Hounsfield-értékek értelmezési tartománya általában -1024-től +3071-ig tart, de a modern készülékeken lehetőség van a skála kiterjesztésére, ezáltal részletesebb felosztására is.

Tekintettel arra, hogy a CT ezek alapján csak a sűrűségkülönbségek mérésére szolgál, ezért azt kell megvizsgálnunk, hogy a megfigyelendő jelenség (pl: tűz hatására bekövetkező anyagszerkezeti változás) kimutatható sűrűségkülönbséget okoz-e.

3. A CT ALKALMAZÁSA AZ ANYAG-VIZSGÁLATOK SORÁN

A CT orvosi diagnosztikai alkalmazása ma már széles körben elterjedt, azonban az anyagvizsgálatok területén alkalmazásuk még egyáltalán nem, vagy kevésbé ismert. A CT a sűrűség különbségek mérésére szolgál, ezért azt kell megvizsgálnunk, hogy az anyagvizsgálatok mely területén elegendő a sűrűségkülönbség mérése, és mely tulajdonságok, illetve milyen anyagszerkezeti változások jellemezhetőek sűrűségkülönbség-méréssel. Tekintettel arra, hogy az építőanyagok nagy része inhomogén, tehát található benne sűrűségkülönbség, ezért anyagszerkezetük CT-vel jól vizsgálható. Továbbá az anyagszerkezeti leromlások során az anyagok sűrűsége, szerkezete lényegesen megváltozik, ezért ezek a folyamatok is vizsgálhatóak CT segítségével.

Méréseinkhez egy harmadik generációs CT berendezést (Siemens SOMATOM Sensation 16) alkalmaztunk, amely a vizsgálat tárgyát egy sík, legyezőszerű röntgensugárnyalábbal világítja át.

A kutatás során komoly kihívást jelentett a CT-felvételek kiértékelése. A CT-felvételek zajossága miatt, a kiértékelés során képfeljavító eszközöket is alkalmaztunk. Ezek közé különböző szűrők (például átlagoló szűrő) tartoztak, továbbá külön foglalkoznunk kellett a CT-re jellemző nyalábkeményedési korrekcióval is.

A felvételeken a különböző sűrűségű anyagokat szétválasztottuk, szegmentáltuk. A CT- felvételek feldolgozása és elemzése Matlab környezetben írt algoritmusokkal, automatikus módon, előre beállított paraméterekkel történt.

A kialakított algoritmusok egyenként elvégzik a CT-felvételeken a szegmentálást, majd elemzés után előállítják a szeletenkénti, térfogatszázalékos statisztikákat. A módszer határai közé tartozik, hogy orvosi CT-vel a 0,4 mm alatti adalékanyag szemcsék nem szegmentálhatóak, ezek szegmentálása csak mikro vagy nano CT-vel oldható meg, de ez építőanyagok esetén ezek az eljárások a korlátozott minta méret miatt nem, vagy csak nehezen alkalmazhatóak.

3.1 Aszfalt vizsgálata CT-vel

Az aszfalt esetén a hézagtartalom jelentősen befolyásolja az útpályaszerkezet tartósságát. A hézagtartalom laboratóriumi körülmények között történő mérése nagyon költséges és bonyolult lehet. A hézagtartalom vizsgálata azonban a CT-készülékkel viszonylag egyszerű, hiszen a hézagok és az adalékanyag, illetve a bitumenhabarcs sűrűsége jelentősen eltér egymástól. Aszfalt minta esetén a hézagtartalom-eloszlás alapján a réteghatárok is egyértelműen azonosíthatóak *(1. ábra)*, mivel a réteghatároknál a hézagtartalom jelentősen megnő. Ennek oka, hogy a burkolat készítésekor hideg aszfalt felületre meleg réteget visznek fel, és az összedolgozás során a két réteg között nagy hézagtartamú rész keletkezik *(Lublóy, Ambrus, Kapitány, 2014),* Fontos kérdés lehet, hogy a réteghatárokon mennyire növekedett meg a hézagtartalom. A laboratóriumi mérések során a próbatestek vizsgálata előtt itt történik a vágás és ezáltal a hézagtartalomban feldúsult részről semmilyen információnk nem lesz, pedig az a rész adhatna információt a két réteg összedolgozásának állapotáról, és ezáltal a pályaszerkezet várható élettartamáról is.

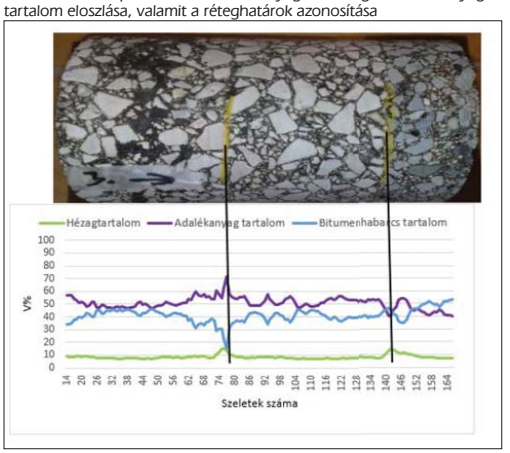
Aszfalt esetén a hézagtartalom mellett a 4 mm feletti adalékanyagszemcsék is jól szegmentálhatóak, vizsgálható az adalékanyagok szem ***(cse?)***alakja, illetve a térbeli eloszlása is.

3.2 Beton vizsgálata CT-vel

A beton vizsgálata bonyolultabb az aszfalt vizsgálatánál, mert az adalékanyag és a cementkő sűrűsége nem tér el olyan jelentősen, mint az aszfalt esetén, így az adalékanyag-szemcsék szegmentálása nehezebb feladat. Betonminta esetén a pórusok egyértelműen azonosíthatóak és ezáltal megadható a próbatest póruseloszlása is. Nagyon fontos, hogy a beton esetén a pórustartalom viszonylag könnyen és egyértelműen meghatározható, hiszen ez a tartóssági kérdéseknél nagyon fontos. Itt azonban meg kell jegyezni, hogy a mikropórusok vizsgálata, ami a fagyállóságot jelentősen befolyásolja csak nagyobb felbontású mikro CT-vel lehetséges, ahol azonban a próbatestek mérete limitált (kb 1 cm oldalhosszúságú kocka). Ez azonban a beton esetén kérdéssé teszi a releváns mintavétel lehetőségét.

Az anyagszerkezet vizsgálata esetén azonban a különböző leromlási folyamatokat is jól nyomon tudjuk követni CT segítségével. A *2. ábrán* egy tűzkárosult betonból vett furatmagminta egy szeletét láthatjuk. A felvételeken jól

1. ábra: Aszfalt próbatest: az adalékanyag-, a hézag- és a kötőanyag-tartalom eloszlása, valamit a réteghatárok azonosítása





2. ábra: Beton próbatest: az adalékanyag- (fehér körvonal) és pórusrendszer (fekete körvonal) a CT rétegfelvételeken

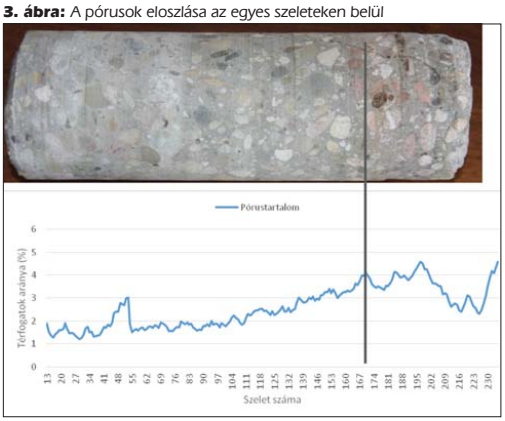
látszanak a kialakult repedések. A *3. ábrán* megadtuk az adalékanyag-tartalmat, a habarcstartalmat és a pórustartalmat a minta hossztengelye mentén. A görbéken látható csúcsok azzal magyarázhatóak, hogy a szeleteken belül eltérő lehet az adalékanyag- és a habarcstartalom. Jól látható, hogy a 100 jelű szelettől a porozitás megnő, ezért a pórustartalmat külön is ábrázoltuk. A *3. ábrán* látszik, hogy a beton felület felső 100 mm vastagságú része károsodottnak tekinthető, ami szilárdságcsökkenésre utal.

A *4. ábrán* falpanelelemek láthatóak a tűzvizsgálat után. A falpanelelemeken a betonfedés levált. A betonfedés leválásnak oka a beton nagy szilárdsága (C 30/37) és az alkalmazott cementtípus (CEM I 52,5 R) volt.

A tűzvizsgálat után a falpanel elemekből magmintát vettünk. A mintavételezés során ügyeltünk arra, hogy a mintákat a jellemző helyekről vegyük, ezért az alsó elemből, ami a legjobban károsodott, négy magmintát, a középső és az alsó elemből 2-2 mintát vettünk. A mintákat CT-vizsgálatoknak vetettük alá. A CT-vizsgálatok eredményeit az *5. ábrán* adjuk meg. Az oszlopdiagramon a magmintákon mért HU értékek átlagát adjuk meg. Az oszlopdiagram alapján megállapíthatjuk, hogy a károsodás mértéke összefügg a meghatározott HU értékkel. A jobban károsodott részen egyértelműen csökkent a HU érték. Ezek alapján megállapítható, hogy abban az esetben is, ha a betonfelület levált, a tűzterhelést, illetve a károsodás mértékét meg lehet határozni CT-mérések segítségével.

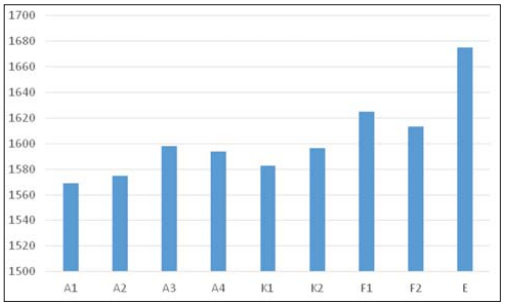
Szálerősítésű betonok esetén nagyon fontos a szálak elhelyezkedése, hiszen ez befolyásolja a szerkezet teherbírását. A száltartalom és a keverési idő szálorientációra, szálelhelyezkedésre való hatásának vizsgálatához CT vizsgálatot végeztünk szálerősítésű betonokon *(6. ábra)*. A CT vizsgálatot a száladagolást követően 5 percig kevert, 0.3 V% száltartalmú, illetve 0.5 V% száltartalmú keverékből és a

3. ábra: A pórusok eloszlása az egyes szeleteken belül





4. ábra: Az alsó falpanel elem károsodása a tűz után



5. ábra: A magminták átlagos HU értéke a falpanelelemekből kifúrt mintákon (A alsó panelelem, K középső panelelem, F felső falpanelelem, E tűzterhelés nélküli panelelem)

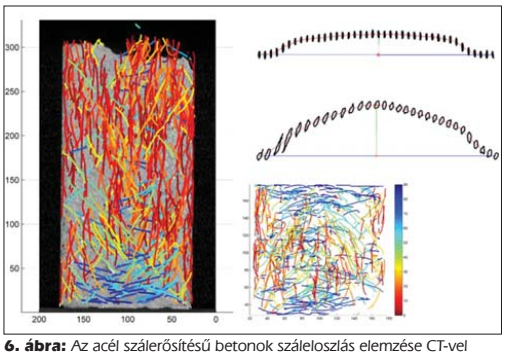
száladagolást követően 30 percig kevert, 0.5 V% száltartalmú keverékből készült 1-1 db félgerendán végeztük.

A CT felvételek alapján a következőket figyeltük meg:

- A száltartalomm változtatásának nem volt jelentős hatása a szálelhelyezkedésre. A szálak betonban való hosszabb keverési ideje (5 perc helyett 30 perc) egyenletesebb száleloszlást eredményezett, azonban nem szüntette meg teljesen a lokális szálfeldúsulásokat.
- A szálak irányultságát jelentősen befolyásolta a betonba adagolt szál mennyisége. A nagyobb (0.5V%) száltartalom esetén a szálak már rétegesen irányítottá váltak.
- Vizsgálataink során kimutattuk, hogy 150×150×600 mm élhosszúságú próbatestek zsaluzott oldalain a szálak a zsaluzat irányába rendeződtek, míg a próbatest közepén véletlen irányultságúak voltak.
- A szálirányultságra nem volt jelentős hatása a keverési idő változtatásának. Jelentős hatása volt azonban a bedolgozásban, illetve a tömörítésben végzett kisebb változtatásoknak.
- Kimutattuk, hogy az acélszálak egy része a betonban való keverés hatására deformálódhat. A deformáció mértéke és gyakorisága csak kis mértékben növekedett a hosszabb (5 perc helyett 30 perc) keverés hatására *(Balázs, Czoboly, Lublóy, Kapitány, Barsi, 2017)*.

3.3 Vasbeton víznyomócső vizsgálata

Vasbetonszerkezetek esetén fontos, hogy az acélbetétek korróziós állapotáról lehetőség szerint a legtöbb információt kapjuk. Az acélbetétek állapota, amiről csak a betonfedés eltávolítása után tudunk nyilatkozni, különösen fontos a későbbi teherbírás megítélése szempontjából. Jelen kutatás során kérdés volt, hogy mi található a már szemmel is



6. ábra: Az acél szálerősítésű betonok szóleloszlás elemzése CT-vel

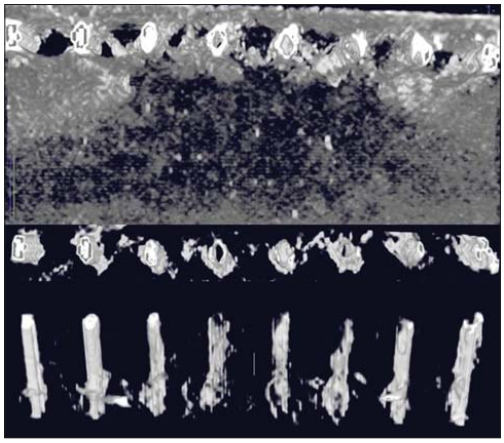
látható rozsdafoltok alatt. A CT felvételen jól látható, hogy az acélbetétek elszakadtak *(7. ábra)*. A nagy rozsdafolt alatt a beton károsodását (kiüregelődését) is megfigyeltük. Az üreg közvetlen környezetéről felvételeket készítettünk. Megállapíthatjuk, hogy az acélbetétek környezetében kisebb sűrűségű rész látható, valószínűleg ez okozta a károsodást. A *7. ábrán* az elszakadt acélbetétek keresztmetszetét is láthatjuk. A felvételeken megfigyelhető, hogy az acélbetétek közepén kiüregelődés jött létre *(Czoboly, Lublóy, Balázs., Zimmer, 2014)*.

3.4 Azbesztcement vízcső vizsgálata

További kérdés, hogy más építőanyagok anyagvizsgálata, illetve leromlásának feltérképezésére is alkalmas-e a CT? Jelen kutatásban a vízvezetékek ismert cső típusát, az azbesztcement csöveket vizsgáltuk.

A *8. ábrán* az azbesztcement csőről készült komputertomográfiás felvétel látható. A CT felvételen a károsodott helyen a cső teherbíró részének elvékonyodása tapasztalható (*8.a. ábra*). A CT-felvétel színeinek módosítása után jobban érzékelhető az árnyalatok közti különbség, így a levált felület is jól elkülöníthető a CT-képeken, úgy ahogy a metszetről készült fényképfelvételen is. A *8.a. ábrán* a világosabb színek a magasabb Hounsfield-értékű (sűrűségű) területeket adják meg, a sötétebb részek pedig az alacsonyabb sűrűségű részeket. A sűrűségcsökkenésből mindig valamilyen anyagszerkezeti leromlásra következtethetünk.

A *8.b. ábrán* a károsodott rész környezetét láthatjuk. Jól látszik, hogy a károsodott rész sűrűségértéke jelentősen csökkent. A sűrűségcsökkenés nem egyenletesen következik be, hanem rétegesen. Ez a réteges sűrűségcsökkenés magyarázza a tényt, hogy más roncsolásmentes vizsgálat elég nehezen végezhető.



7. ábra: A Sentab csövek vizsgálata CT-vel

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikk keretein belül röviden áttekintettük, hogy a CT-vizsgálatok hogyan használhatóak célszerűen az építőanyagok vizsgálataihoz.

Vizsgálataink sorába tartoztak aszfalt, beton, vasbeton és azbesztcement elemek.

A kutatások eredményeink alapján megállapíthatjuk, hogy a

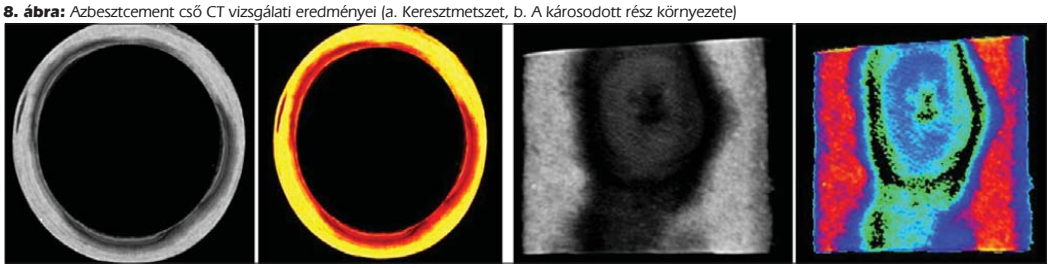
- CT alkalmas a porózus építőanyagok belső szerkezetének feltérképezésére, természetesen a mérés során alkalmazott szeletvastagság és képi felbontás figyelembevételével, az ott létrejövő korlátok betartása mellett;
- a CT alkalmas az anyagokban bekövetkező szerkezeti változások (leromlás) nyomon követésére;
- a CT alkalmas az acélbetétek korróziós állapotának megítélésre a betonfedés eltávolítása nélkül.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 "Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

8. ábra: Azbesztcement cső CT vizsgálati eredményei (a. Keresztmetszet, b. A károsodott rész környezete)



6. HIVATKOZÁSOK

Balázs, L. Gy., Czoboly, O., Lublóy, É., Kapitány, K., Barsi, Á. (2017), „Observation of steel fibres in concrete with Computed Tomography", *Construction and Building Materials* 140, pp. 534-541., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.114

Berényi E., Bogner P., Horváth Gy., Repa I. (1997), Radiológia. Springer Hungarica, Budapest, 1997 Buzug, T. M. (2008), „Computed Tomography - From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT", Berlin/Heidelberg : *Springer-Verlag*, 978-3-540-39407-5.

Czoboly O., Lublóy É., Balázs L. Gy., Zimmer P. (2014), „Leromlási folyamatok Sentab Típusú nagy átmérőjű feszített vasbeton nyomócső esetén", *Konferencia Kiadvány,* XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2014. Csíksomlyó, Románia, 2014.06.12-15, Kiadó Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) Kolozsvár, pp. 46-49.

Földes T. (2011) Kőzetkarakterizáció röntgen computer tomográf (CT) mérésekkel végzett hidrodinamikai vizsgálatokkal, Újdonságok a geotermikában: Geotermikus koordinációs és innovációs alapítvány időszakos kiadványa, pp. 25-42.

Lublóy É., Ambrus D., Kapitány K. (2014), „Aszfalt összetétel vizsgálata CT-vel", *Konferencia Kiadvány,* XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2014. Csíksomlyó, Románia, 2014.06.12-15, Kiadó Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) Kolozsvár, pp. 186-189.

Russ, J. C. (2011), „Image Processing Handbook", *Book*, Sixth Edition, ISBN: 1-4398-4045-8, CRC Press

Dr. Lublóy Éva (1976) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar, 2001), docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén (2008). Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A ***fib*** Magyar Tagozat tagja.

Dr. Balázs L. György (1958) okl. építőmérnök, mérnöki matematikai szakmérnök PhD, Dr. habil., egyetemi tanár, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék vezetője. MTA műszaki tud. kandidátusa. Fő kutatási területei: beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), roncsolásmentes vizsgálatok. Speciális betonok és betétek: szálerősítésű betonok (FRC), nem acélanyagú (FRP) betétek, megerősítések anyagai és módjai, HPC, UHPC, LWC. Tűzállóságra való tervezés, tűzállóság fokozása. Fagyállóság fokozása. Kémiai ellenálló-képesség fokozása. Tartósság. Használati élettartam. Fenntartható építés. Erőátadódás betonban, vasbeton tartók repedezettségi állapota. Fáradás. Lökés szerű terhelés. Nukleáris létesítmények. A ***fib*** (Nemzetközi Betonszövetség) elnöke (2011-2012), jelenleg tiszteletbeli elnöke. A ***fib*** Magyar Tagozat elnöke. Az Int. PhD Symp. in Civil Engineering alapítója. A ***fib*** Com 9 „Dissemination of knowledge" elnöke.

Földes Tamás (1954) okl. geológus (ELTE 1979), 2005-ig a Kőolajkutató vállalatnál, majd pedig a MOL Rt-nél dolgozott. 2006-tól a Kaposvári Egyetem Diagnosztikai Intézetének munkatársa. 1999-től végez CT és MR mérési értékeléseket élettelen vizsgálati anyagokon, elsősorban kőzeteken. Fő érdeklődési területe: szénhidrogén rezervoár, geológiai modellezés, nagyfelbontású képalkotó roncsolásmentes mérések (CT, microCT, MR), élettelen anyagvizsgálati módszerek kiértékelése. A Magyarhoni Földtani Társulat, a Geofizikai Társulat és az EAGE tagja.

Dr. Kapitány Kristóf (1987) építőmérnöki (térinformatikus) BSc (BME Építőmérnöki Kar, 2009), Földmérő- és térinformatikai mérnök MSc (BME Építőmérnöki Kar, 2012), PhD hallgató a BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszékén. Fő érdeklődési területei: képfeldolgozás, orvosi képalkotás, objektumrekonstrukció orvosi képekből.

Hlavička Viktor (1987) okl. szerkezetépítő-mérnök (MSc), betontechnológus, tűvédelmi tervezési szakmérnök, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék doktorjelöltje. Fő érdeklődési területei: rögzítéstechnika, mechanikus és ragasztott csapok betonokban való viselkedése és végeselemes modellezése, tűzkárosult szerkezetek és szerkezeti anyagok mérnöki tanulságai. A ***fib*** Magyar Tagozat tagja.

POSSIBILITY OF APPLICATION OF CT IN CASE OF BUILDING MATERIALS

Dr. Éva Lublóy – Dr. György L. Balázs – Tamás Földes – Dr. Kristóf Kapitány – Viktor Hlavička

Keywords: material testing, CT, material structure, non-destructive testing

Detailed information on the internal structure of building materials is highly important for us, as it highly affects properties and durability of materials. Some information about the internal structure can only partly be obtained by analytical methods.

Images generated during a computer tomograhic (CT) scanning are able to show sections of the specimens. The images that are constructed by a data matrix show the density distribution of the material tissue. Elements that have different density are visually separated and, therefore, can be clearly identified. If the sections are displayed in a line then the internal structure can be visualized in 3D.

Lublóy Éva, Hlavička Viktor, Nagy Balázs, Biró András, Burai Balázs, Balázs L. György

KÖRÜREGES FÖDÉMPALLÓ TERMIKUS VIZSGÁLATA ÉS MODELLEZÉSE

Absztrakt

A körüreges födémpallók kedvelt szerkezeti elemek, hiszen nagy teherbírású elemeket lehet létrehozni viszonylag kis szerkezeti súllyal. A bennük található üregek miatt azonban tűzhatásra máshogy viselkednek, mint a hagyományos födémek, ezért kiemelten fontos a tűzeseti viselkedésükkel foglalkozni. Az üregek hatására az ilyen típusú elemek gyorsabban átmelegszenek, és emiatt tönkremenetelük is gyorsabb, mint a hagyományos sík födémeknek. Jelen cikkünkben egy körüreges födémpalló magas hőmérsékleten való viselkedését mutatjuk be laboratóriumi kísérletek és kiegészítő numerikus modelleken keresztül.

Kulcsszavak: tűz, körüreges födémpalló, nagyelemes kísérlet, numerikus modell

THE MODELLING AND THERMALBEHAVIOR OF HOLLOWCORE SLAB UNDER FIRE CONDITIONS

Abstract

The hollowcore slabs are popular structural elements, since they are high capacity elements with small structural weight. However due to the hollows in them, they behave differently in a case of fire than the conventional slabs, so it is of great importance to observe their fire behaviour. Due to the hollows, these slabs warm up faster and therefore their failure is also faster than conventional slabs. In our article, we show the behaviour of hollowcore slabs under fire conditions by laboratory tests and numerical analysis.

Keywords: fire, hollowcore slabs, real structure element test, numerical analysis

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A teherbírás számításához ismernünk szükséges az egyes szerkezeti elemek erőjátékát és a tönkremeneteli formáját. A körüreges födempallók tűzterhelése során a következő tönkremenetelek alakulhatnak ki:

- hajlítási tönkremenetel (felső öv tönkremenetele nélkül, felső öv tönkremenetelével),

- nyírási tönkremenetel (hajlítási nyírási tönkremenetel, gerinc nyírási tönkremenetele hosszirányban, illetve függőlegesen),

- a lehorgonyzás tönkremenetele,

- a betonfelület leválása,

- a megengedett maximális lehajlási érték túllépése.

A körüreges födempallók méretezésének kérdésével a CEB [1], FIP [2] és a prEN [3] foglalkoztak. Ezen méretezési szabványok azonban nem térnek ki a tűzeseti viselkedésre.

Tűzeset alatti különleges viselkedésük miatt viszonylag sok kutató végzett kísérleteket, és állított fel a kísérletek alapján különböző számítási modelleket.

Borgogno [4] megállapította, hogy mind normál hőmérsékleten, mind tűz alatt a feltámasztás módja jelentősen befolyásolja a tönkremeneteli módot.

Shakya és Kodur [5] 6 darab körüreges födém pallót vizsgált tűzteherre. A födempallók hossza 4 m, a szélessége 1,2 m magasságuk pedig 200 mm volt. A pallók 6 darab 150 mm átmérőjű üreget tartalmaztak Az üregek távolsága az elem szélétől 132,5 mm, az üregek közötti távolság 187 mm volt. Az alsó sorban 7 darab feszítőpászma került elhelyezésre. Az alkalmazott betonfedés 44 mm volt.

Megfigyelték, hogy:

- A lehajlás- felfűtési idő görbe 3 részre osztható. Az 1. szakasz 20 percig tart ezen a szakaszon a lehajlás növekedését figyelhetjük meg a hőmérséklet növekedésével. A második szakaszon

20 és 75 perc között lajlás növekmény nagyobb lesz, mint az első 20 percben. 75 perc után (3. szakasz) a lehajlás még erőteljesebb növekedése következik be.

Shakya, Kodur [5] kísérleteik alapján a következő megállapításokat tették:

1.) a körüreges födémpallók két órás tűzállósággal rendelkeztek, 20% teherszint mellett,

2.) a megtámasztási viszonyok befolyásolják a tűzállóságot,

3.) a mészkő adalékanyagú betonok jobb nyírási teherbírást adtak tűz esetén, mint a hagyományos kvarckavics adalékanyagú betonok.

A kísérleti eredmények alapján a körüreges födémpallók numerikus modellezését is elvégezték. A modellhez ANSYS végeselem szimulációs szoftvert használtak. A beton elemek hőtechnikai modellezéséhez SOLID 70 majd a mechanikai modellhez SOLID 65 elemeket használtak. A feszítőbetét hőtechnikai modellje LINK 33, a mechanikai modellje LINK 180 elemmel készült. Az elemek hőtechnikai modellje SURF 152, majd a mechanikai modell SURF 154 elemmel készült. A beton és a feszítőbetétek hőmérséklet emelkedésének hatására bekövetkező szilárdságcsökkenést az Eurocode (MSZ EN 1992-1-2) alapján vették fel. A beton modell plasztikus részét Willam Warnke modellje alapján alakították ki. A numerikus modell validálása a kísérleti eredmények alapján történt. A modell és a kísérlet eredményei jó egyezést mutattak.

Más kutató a végeselemes számítás kiváltására analitikus számítási modellt javasolnak. Borgongo [4] megállapította, hogy a körüreges födémpallók esetén az egyik leggyakoribb tönkremeneteli forma a nyírás, ennek számítására az alábbi számítási módszert javasolja:

$$V_{uk,fi} = 0{,}068 b_w d \xi \left[1 + \frac{50 A_p f_{pufi}}{b_w d f_{pu}}\right] \sqrt{f_{ct}}$$

ahol:

V_{uk}	a nyírás tervezési határértéke (karakterisztikus értéke)
b_w	gerinc vastagság
d	hatékony magasság
ξ	1,6-d≥1

A_p a feszítő pászmák keresztmetszeti területe az alsó övben

f_{pufi} a feszítőpászmák magas hőmérsékleten mért szakítószilárdsági értéke

f_{pu} a feszítőpászmák szakítószilárdsági értéke

f_{ct} a beton nyomószilárdságának értéke magas hőmérsékleten.

A körüreges födémpallók nyírási teherbírás számítására Acker (2003) is adott egy számítási javaslatot:

$$V_{RD,c,fi} = \left[C_{Rd,c}k(100\varrho_{l,fi}f_{c,fi,m})^{1/3} + k_l\sigma_{cp,fi}\right]b_w d$$

ahol:

$V_{RD,c,fi}$ a nyírási teherbírás tervezési határértéke

$C_{RD,c}$ $0{,}18/\gamma_c$ (γ_c a beton biztonsági tényezője)

$k = 1 + \sqrt{200/d}$

d hatékony magasság

$\rho_{l,fi}$ a hosszirányú vasalás aránya

$= \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0{,}02$

A_{sl} a húzott vasalás keresztmetszeti terület

b_w gerinc vastagság

$f_{c,fi,m}$ a beton nyomószilárdságának értéke magas hőmérsékleten

k_l=0,15

$\sigma_{cp,fi}=N_{Ed}/A_c$

N_{Ed} a feszítőerő nagysága

A_c a beton keresztmetszeti területe mm^2-ben.

Ezen számítási képletek alkalmazása esetén, a keresztmetszeten belüli hőmérséklet eloszlást ismerni kell, aminek modellezése nem egyszerű feladat, hiszen az üregekben a meleg levegő áramlásának hatására a beton gyorsabban melegszik át, mint az üreg nélküli szerkezeteknél.

2. TŰZVIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

A födémpalló tűzvizsgálatával egyidejűleg a födémpalló betonjából készült kockák és hasábok hőterhelését majd a maradó szilárdság vizsgálatát is elvégeztük. A kísérleteink (kiselemes és nagyelemes vizsgálatok) során a szabványos (standard), vagyis a magasépítési szerkezetekre, és a csarnokokra alkalmazható tűzgörbéhez közeli felfűtési görbét alkalmaztunk.

2.1 Kiselemes vizsgálatok beton próbatesteken

A födémpalló vizsgálata során alkalmazott betonösszetételt az *1. táblázatban* adjuk meg. A tervezett betonminőség C50/60-XC1-11-S1. A födémpallók gyártása hosszúpályás technológiával, extruderes betonsajtolással, pályafűtéssel, 12-16 órás érlelési idővel történik. Ehhez a technológiához szükséges a zúzott kő mint adalékanyag alkalmazása, ezért a receptúrában a 4/11 frakció zúzott dolomit volt.

1. táblázat: Az alkalmazott betonösszetétel

Anyag	**Fajta vagy frakció**		**Tömeg (kg/m^3)**
Adalékanyag	0/4 mm frakció	46%	879
	4/8 mm frakció	26%	496
	dolomit NZ 4/11	28%	555
	Összesen	100%	1912
Cement	CEM I 42,5 R		370
Víz	m_w/m_c=	40,0%	148
Adalékszer cem. m%	Murasan BWA 16	0,35%	1,3
Levegő			-
Összesen			2431

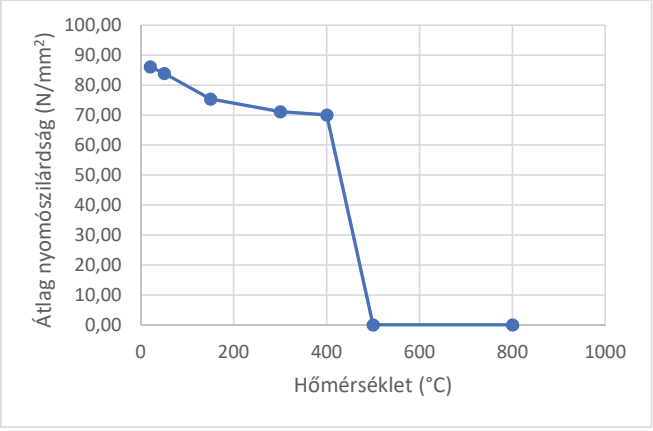
A kiselemes beton próbatesteket a kizsaluzás után 7 napig vízben, majd a hőterhelésig (28 napos korig) laboratóriumi körülmények között tároltuk.

A próbatestek hőterhelése után a nyomószilárdság vizsgálatot 150x150x150 mm élhosszúságú a laborlevegőn már lehűlt próbakockákon végeztük el, ALPHA 3-3000 S típusú törőgéppel. A törőgép terhelési sebessége 11,25 kN/s volt.

A hőterhelés után a 250x70x70 mm-es hasáb próbatesteket központos hajlító-húzószilárdsági vizsgálatnak vetettük alá. A hasábokat is a hőterhelést követően laborlevegőn lehűlt állapotban terheltük.

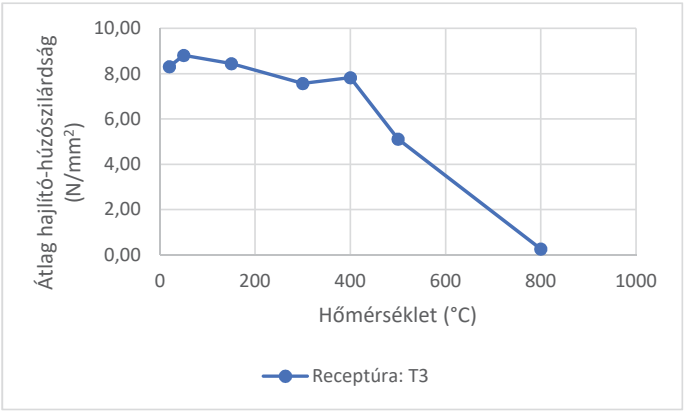
Az *1. ábrán* a beton nyomószilárdságának alakulását adjuk meg a hőmérséklet függvényében. 500 °C-ig a betonszilárdság egyenletes csökkenését figyelhetjük meg, 500 °C felett a próbatestek a hőterhelés hatására felrobbantak ezért a szilárdság értékét itt 0 N/mm^2-re vettük fel.

A beton próbatestek 500 °C-os hőterhelés hatására való felrobbanásának magyarázata a beton magas nyomószilárdsága 85 N/mm^2 lehet. Ez a szilárdság jóval, mintegy 50 %-kal meghaladja a tervezett szilárdsági értéket. Normál hőmérsékleten ez előnyös lehet a teherbírás szempontjából, tűz alatt azonban a szerkezet idő előtti tönkremenetelét okozhatja.



1. ábra: A beton nyomószilárdsága-a hőterhelés hőmérsékletének függvényében (minden pont három mérés átlaga)

A *2. ábrán* a beton hajlító-húzószilárdságának alakulását adjuk meg a hőmérséklet függvényében. 500 °C-ig a betonszilárdság egyenletes csökkenését figyelhetjük meg, 500 °C felett viszont lényegesen erőteljesebb szilárdságcsökkenést tapasztaltunk.



2. ábra: A beton hajlító-húzószilárdsága-a hőterhelés hőmérsékletének függvényében (minden pont három mérés átlaga)

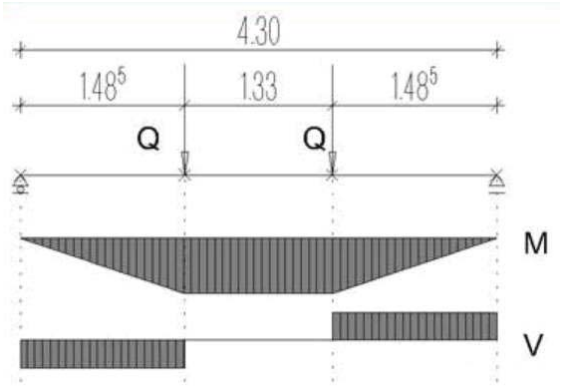
2.2 Nagyelemes vizsgálat

2.2.1 Szerkezeti kialakítás

A vizsgált födémpallók hossza 4,3 m a szélessége 1,2 m magaságuk pedig 200 mm volt. A pallók 6 darab 155 mm átmérőjű üreget tartalmaztak Az üregek távolsága az elem szélétől 41 mm, valamint az üregek közötti távolság 34 mm volt. Az alsó sorban 7 darab feszítőpászma került elhelyezésre. Az alkalmazott betonfedés 25 mm volt.

2.2.2 Alkalmazott terhelés

A statikai modell kéttámaszú tartó volt, két vonalmenti terheléssel (*3. ábra*). A terhelő erő értéke Q = 36 kN volt. Ezzel a terheléssel a tartó tűz estén alkalmazható terhelhetőségét határoztuk meg, a normál hőmérsékleten meghatározott (gyártói ajánlás) teherbírás alapján.



3. ábra: A tűzvizsgálatnál alkalmazott statikai modell

2.2.3 Szemrevételezés a tűzterhelés után

A födémpallót vízszintes kemencében hőterheltük. A hőterhelés alatt több ponton mértük a hőmérséklet alakulását, valamint a födémpalló lehajlását. A tűzvizsgálat során folyamatosan figyeltük a födémpallók károsodásának jeleit.

A szemrevételezés során a következő károsodásokat figyeltük meg:

- 5.-6. perc: hosszirányú nyírási repedés
- 14. perc: megjelenek az első hosszirányú repedések
- 18. perc: vízszintes repedések
- 29. perc: a födémpalló tönkrementetele.

A tűzterhelés alatt a körüreges födémpallókon látható károsodásokat fényképekkel dokumentáltuk. A *4-6. ábrán* láthatjuk a tűzterhelés alatti károsodásokat.

A tűzvizsgálat alatt a következő károsodások következetek be:

1. A körüreges födémpalló felemelésére kialakított elkeskenyített részen megjelent egy hosszirányú nyírási repedés (*4. ábra),* a tűzvizsgálat 5.-6. percében.

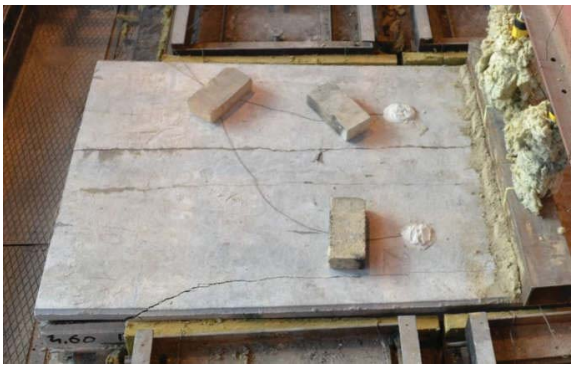


4. ábra: A körüreges födémpalló első repedése a tűzvizsgálat 5.-6. percében (2017. 12. 07.)

2. A tűzvizsgálat 14. percében megjelenek az első hosszirányú repedések, amik 1,59-5,31 mm pászmabehúzódással járnak *(5. ábra).* A repedések vagy a körüregek közepénél, vagyis a tartó legvékonyabb keresztmetszeti részénél, vagy a pászmák középpontjából kiindulva futnak. A pászmák jelentős behúzódása volt tapasztalható.





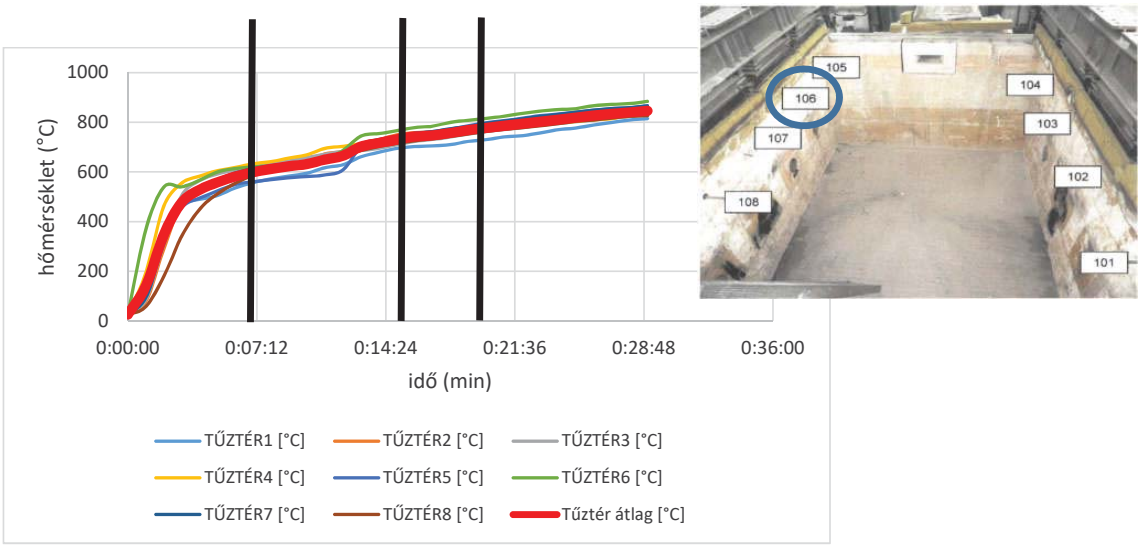


5. ábra: A körüreges födémpallón megjelenő hosszirányú repedések és pászma behúzódás (2017. 12. 07.)

3. A körüreges födémpallón vízszintes repedések jelenek meg a tűzvizsgálat 18. percében (*6. ábra*)

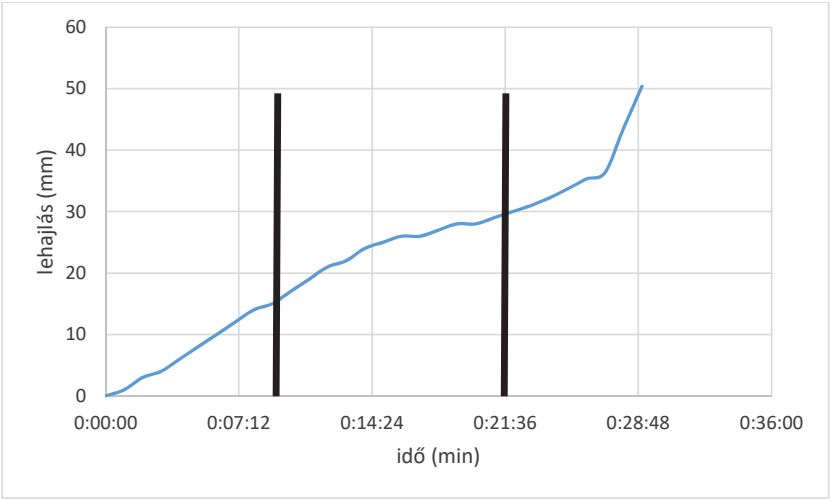


6. ábra: A körüreges födémpallón megjelenő vízszintes és függőleges repedések (2017. 12. 07.)



7. ábra: A hőmérséklet alakulása a vizsgálat alatt (2017. 12. 07.)

A *7. ábrán* a tűztér hőmérsékletének alakulását adjuk meg, függőleges vonalakkal jelöltük a repedések kialakulásának időpontjait. Jól látható, hogy 6 jelű ponton a kezdeti hőmérséklet emelkedés mértéke a kezdeti szakaszban jóval nagyobb volt, mintegy 100 °C magasabb, mint a többi ponton ez a hőmérséklet különbség okozhatta az első repedés megjelenését *(3. ábra)*. A panelelem hosszirányú repedésének megjelenése után a hőmérséklet kismértékű növekedését figyelhetjük meg a diagramon.



8. ábra: A lehajlás alakulása a vizsgálat alatt (2017. 12. 07.)

A *8. ábrán* a lehajlás alakulását adjuk meg a vizsgálat időtartama alatt. Megállapíthatjuk, hogy a hosszirányú repedések (2. vonal) megjelenése után a lehajlás sebessége (görbe meredeksége) megváltozott. A következő változás a vizsgálat végén következet be, amikor a lehajlás sebességének erőteljes növekedését figyelhetjük meg. Ezek alapján a lehajlás-idő görbe 3 részre osztható.

3. MODELLEZÉSI KÉRDÉSEK

3.1 Alkalmazott anyagjellemzők

Az alkalmazott modellekben betont és acélt használtunk. Az anyagok hőtechnikai paramétereit az MSZ EN 1992-1-2 és az MSZ EN 1993-1-2 alapján határoztuk meg.

A beton és az acél esetén a sűrűség, a hővezetési tényező, a fajhő, mint hőtechnikai jellemzők hőmérséklet függő értékei kerültek be a modellbe. A beton esetén a hővezetési tényező felső határértékét alkalmaztuk, míg a fajhőt 3%-os nedvességtartalomhoz adtuk meg.

3.2 Hőtechnikai modellezés

A hőtechnikai modellezés során a tranziens hőtranszport parciális differenciálegyenletét oldottuk meg, melyet a következőképpen írhatunk fel:

$$\frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

ahol:

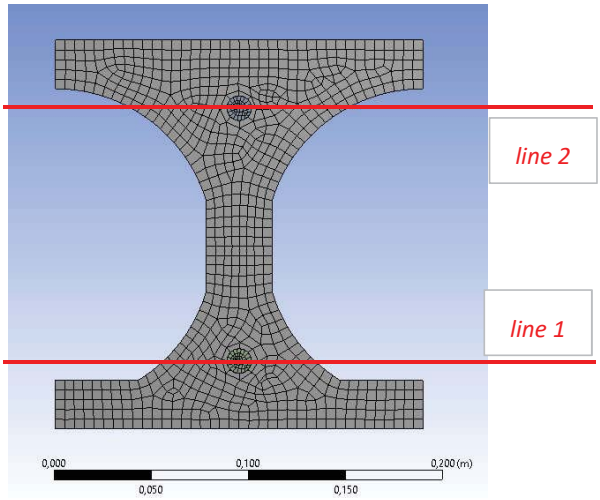
a	hődiffuzitás
	$= \frac{\lambda}{\rho c}$
	λ hővezetési tényező
	ρ sűrűség
	c fajhő
T	hőmérséklet
t	idő
x, y	irány

A modell elkészítéséhez ANSYS végeselemes szoftvert használtunk. A 2D modellekben a teljes tartó egy szelete került kialakításra, kihasználva a szimmetriát, ezzel csökkentve a számítási igényt. A modelleknél alkalmazott végeselemes háló mérete 5,0 mm volt *(9. ábra).*

A modellekben a peremfeltételeket a hőteherrel közvetlenül nem érintett peremek esetén az MSZ EN ISO 6946, míg a tűz miatt hőterhet kapó peremek esetén az MSZ EN 1992-1 szabványok szerint vettük fel. A panelek tetején konvektív hőátadást, az üregekben és a panel alján egyidejűleg konvektív hőátadást és hősugárzást is felételeztünk. A tartókat ért hőterhelést az ISO 834-1 belső hőmérsékleti görbe alapján határoztuk meg.

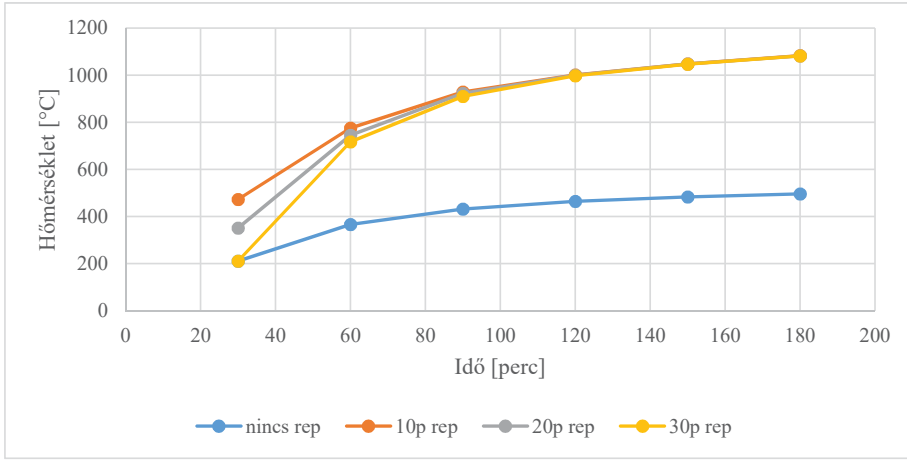
Az elemzés során saját kísérleti tapasztalatok és a szakirodalom alapján feltételeztük a panelek alsó övének vízszintes irányú berepedését. Itt meg kell említenünk, hogy a berepedés hatására a külső meleg levegő bejut az üregekbe, ennek következtében az üreg fala is megkapja ugyan azt a hőterhelést mint a panel alsó öve, tehát gyorsabban melegszik át. Mivel a berepedés

időpontja változó a terhelés és a betonminőségtől függően ezért az elemzés során több lehetséges esetet is vizsgáltunk (alsó öv berepedésének vizsgált időpontja a hőterhelés kezdetétől számítva: 10. perc, 20. perc, 30. perc, 60. perc).

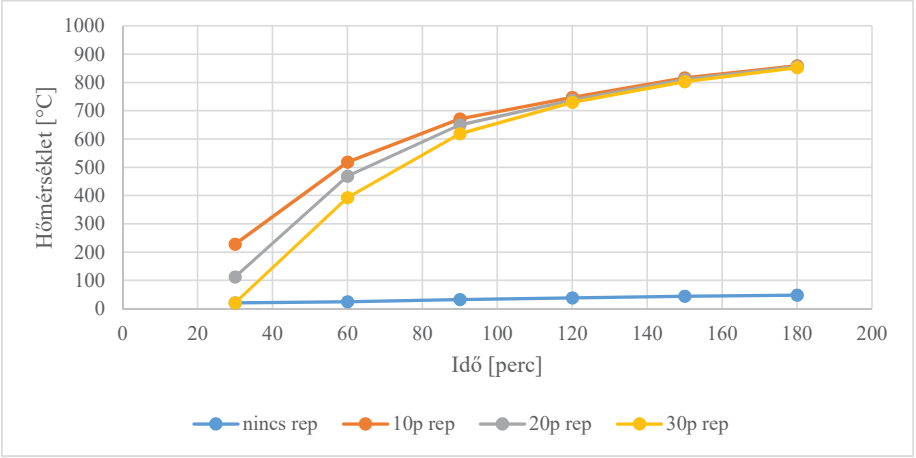


9. ábra: Végeselemes elem modellje

A vizsgálat során az alsó (line 1) és a felső (line 2) pászmák hőmérsékletének időbeli alakulását vizsgáltuk. A *10. és a 11. ábra* az alsó és a felső pászma hőmérséklet változását szemlélteti az alsó öv berepedésétől függően.

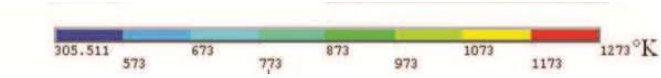


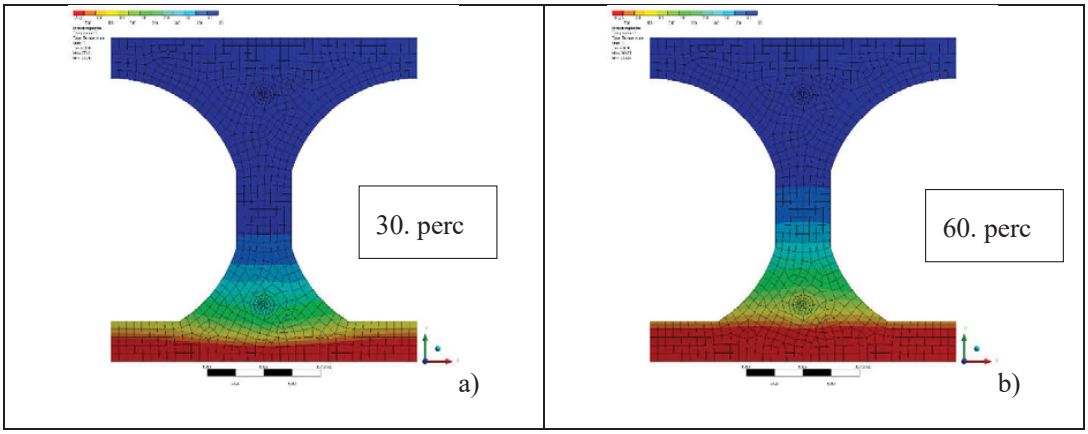
10. ábra: Az alsó pászmasor hőmérséklet változása

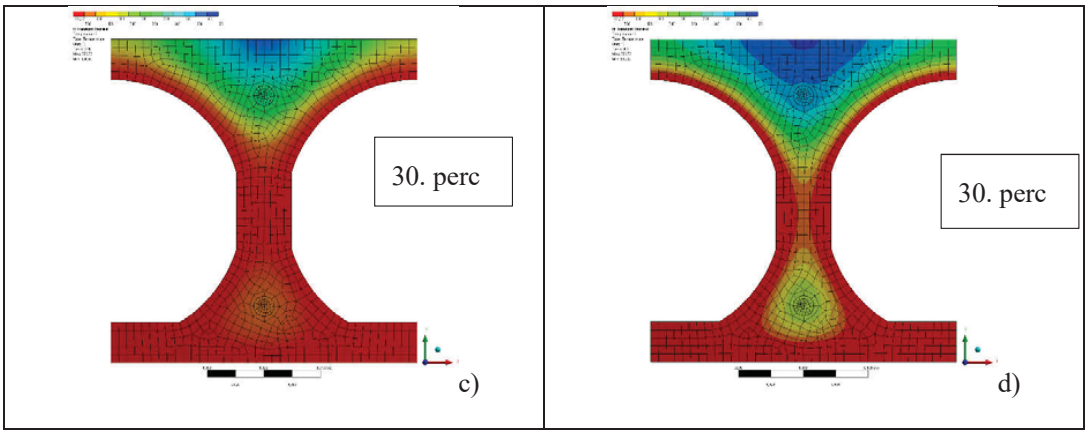


11. ábra: A felső pászmasor hőmérséklet változása

A *12. ábra* a körüreges födémpanel átmelegedését szemlélteti a hőterhelés kezdetétől számított 30. és 60. percben. A *12 a) és a b) ábrák* azt az esetet adják meg, amikor nem reped át az alsó öv. A *12. c) ábra* azt az esetet szemlélteti, amikor azt feltételeztük, hogy a tartó alsó öve a 10. perc után reped át. A *12. d) ábra* azt az esetet szemlélteti, amikor az feltételeztük, hogy a tartó alsó öve a 20. perc után reped át.

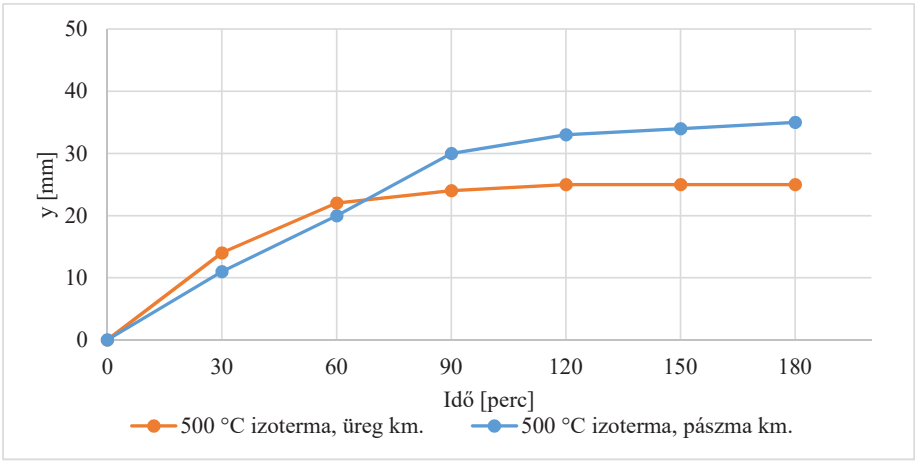






12. ábra: körüreges födémpanel izotermavonalai, a) nem bereped állapot 30. perce, b) nem berepedt állapot 60. perce, c) a 10. percben berepedt állapot 30. perce, d) a 20. percben berepedt állapot 30. perce

A *12. a) ábrán* jól látható, hogy 30. perc után a tartó alsó öve jelentős mértékben átmelegedett. Ezért megvizsgáltuk a körüreges födémpanelen belül az 500 °C-os izoterma vonalának helyzetét. A *12. ábra* az 500 °C izoterma vonal helyét mutatja az alsó, azaz a tűznek kitett felülettől számítva az az üregnél és a pászmánál felvett keresztmetszetben.



12. ábra: A körüreges födémpanel, 500 °C-os izoterma vonalának helyzete a hőterhelésnek kitett felülettől számítva az üregnél és a pászmánál felvett keresztmetszetben

A berepedés pillanatát az alsó öv 500 °C-ra történő átmelegedését tekintjük. A *2. táblázatban* adjuk meg a további statikai számítás bemenő adatait. Ezek alapján a tartó berepedése 20 perc után következik be. A modell ilyen jellegű átalakítása jól tükrözi a tűzvizsgálat eredményeit, hiszen ebben az esetben a várható tönkremenetel röviddel 20 perc után következhet be.

2. táblázat: Statikai számítás bemenő adatai

Név	Alsó öv vastagsága [mm]	Berepedés pillanata [perc]	Keresztmetszet csökkenésének értéke [mm]	Alsó sorban lévő pászmák hőmérséklete [°C]	Felső sorban lévő pászmák hőmérséklete [°C]
M200	25	20	25	351	112

3.3 Kapcsolt hő- és áramlástani modellezés

Az eddigiekben végzett kétdimenziós, tranziens hőtechnikai szimulációk során az üregekben található levegő konvektív-, valamint az üregfelületek peremén lévő felületek sugárzásos hőtranszportfolyamatait peremfeltételkén kezeltük. A modellünk tisztán izotropikus szilárdtest alapú, hővezetési feladatot megoldó modell volt.

A továbbiakban célunk a modell fejlesztése Nagy és Tóth [6] numerikus modellezése alapján. Egy kapcsolt hő- és áramlástani modell segítségével, az üregekben lévő zárt légréteg természetes áramlása modellezhetővé válik, aminek segítségével a szerkezet átmelegedése még pontosabban leírható.

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A körüreges födémpallók az üregek miatt tűzhatásra máshogy viselkednek, mint a hagyományos födémek. Ezért fontos a tűzeseti viselkedésükkel foglalkozni. Jelen cikkünkben egy körüreges födémpalló magas hőmérsékleten való viselkedését mutatjuk be laboratóriumi kísérletek és kiegészítő numerikus modelleken keresztül.

A födémpalló tűzvizsgálatával egyidejűleg a födémpalló betonjából készült kockák és hasábok hőterhelését majd szilárdságvizsgálatát is elvégeztük. A kísérleteink (kiselemes és nagyelemes vizsgálatok) során a szabványos (standard), vagyis a magasépítési szerkezetekre, és a csarnokokra alkalmazható tűzgörbéhez közeli felfűtési görbét alkalmaztunk

A födémpallók vízszintes kemencében hőterheltük. A hőterhelés alatt több ponton mértük a hőmérséklet alakulását, valamint a födémpalló lehajlását. A tűzvizsgálat alatt a födémpallók károsodását folyamatosan jegyeztük.

A szemrevételezés során a következő károsodásokat figyeltük meg:

- 5-6. perc hosszirányú nyírási repedés
- 14. perc megjelenek az első hosszirányú repedések
- 18. perc vízszintes repedések
- 29. perc a födémpalló leszakadása.

A 6. jelű hőterhelési ponton a hőmérséklet emelkedés mértéke a kezdeti szakaszban jóval nagyobb volt, mintegy 100 °C magasabb, mint a többi ponton. Ez a hőmérséklet különbség okozhatta az első repedés megjelenését. A panelelem hosszirányú repedésének megjelenése után a hőmérséklet kismértékű növekedését és a lehajlási sebesség változását figyeltük meg. A lehajlás sebességének erőteljes növekedése a vizsgálat végén következet be.

A hőtechnikai modellből kapott izoterma vonalakon, jól látható, hogy 30 perc után a tartó alsó öve jelentős mértékben átmelegedett. Ezért megvizsgáltuk a körüreges födémpanelen belül az 500 °C-os izoterma vonalának helyzetét. Ez alapján a modellt módosítottuk és a berepedés pillanatának az alsó öv 500 °C-ra történő átmelegedését tekintjük. Ezek alapján a tartó berepedése 20 perc után következik be.

A modell ilyen jellegű átalakítása jól tükrözi a tűzvizsgálat eredményeit, hiszen ebben az esetben a várható tönkremenetel röviddel 20 perc után következhet be.

Köszönetnyilvánitás

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 "Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. Ezen kutatás a Bolyai János és Bolyai+ Felsőoktatási Fiatal Oktatói, Kutatói (ÚNKP-18-4) Ösztöndíj támogatásával készült. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Bolyai János Ösztöndíjon keresztül kapott kutatási támogatásért.

HIVATKOZÁS

[1] CEB (1978) N° 137.1980. Compléments au Code-Modèle CEB-FIP 1978, CEB-FIP Model Code 1978

[2] FIP (1988) Precast prestressed hollow core floors, 48 pages, ISBN 978-0-7277-1375-9)

[3] EN 1993-1-2 (Eurocode 3): Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints

[4] Borgogno W. (1997), Structural Behavior of Slim Floor Covering with Concrete Hollow Slabs at Room Temperature and Elevated Temperature, Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, 1997.

[5] Shakya, A. M., Kodur, V. K. R. (2015): Response of precast prestressed concrete hollowcore slabs under fire conditions, Engineering Structures, Volume 87, 2015, Pages 126-138, ISSN 0141-0296, http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.018.

[6] Nagy B., Tóth E. (2017): „Finite Element Analysis of Composite Ceramic-Concrete Slab Constructions Exposed to Fire”, Applied Mechanics and Materials, Volume 861, Pages 88-95 DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.861.88

Dr. Lublóy Éva PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

lubloy.eva@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-9628-1318

Hlavička Viktor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

hlavicka.viktor@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-5435-4400

Nagy Balázs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

nagy.balazs@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0003-1373-5930

Dr. Balázs L. György, PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

balazs.gyorgy@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0003-0951-6217

Lublóy Éva, Hlavička Viktor, Kapitány Kristóf

BETON TŰZTERHELÉS UTÁNI SZILÁRDSÁG- ÉS MIKROSZERKEZETI VIZSGÁLATA CT-VEL

Absztrakt

Jelen cikkben csak a beton kémiai átalakulásának hatását vizsgáljuk a beton szilárdsági és belső szövetszerkezeti jellemzőire. Ezekbe beleértendőnek érezzük a melegítés során kialakuló belső szerkezeti átalakulásokat és repedéseket is. A vizsgálatok során 7 darab betonreceptúra nyomószilárdságát, hajlító-húzószilárdságát és testszilárdságát vizsgáltuk a hőmérséklet függvényében. Az alkalmazott hőlépcsők: 20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C voltak. Mivel a pórusrendszer, illetve a repedések száma a hőmérséklet emelkedésének hatására változik és ez jelentősen befolyásolja a szilárdság alakulását, ezért a szilárdsági vizsgálatainkat kiegészítettük CT vizsgálatokkal is. A vizsgálatok során igazoltuk, hogy a CT vizsgáltok egyértelműen alkalmasak a hő (tűz) terhelt betonok vizsgálatára, vagyis a szilárdság csökkenést befolyásoló anyagszerkezeti átalakulások nyomon követésére.

Kulcsszavak: beton, magas hőmérséklet, tűz, anyagszerkezeti változás, CT

EXAMINATION OF CONCRETE STRENGTH AND MICRO-STRUCTURE AFTER FIRE BY COMPUTED TOMOGRAPHY

Abstract

In this study we examine the effect of high temperature on the concrete strength and on the concrete matrix, including chemical changes and the cracks. During the experiments we tested the compression strength, the flexural tensile strength and the body strength of 7 different concrete mixtures after fire load. The applied temperature steps were 20, 50, 150, 300, 400,

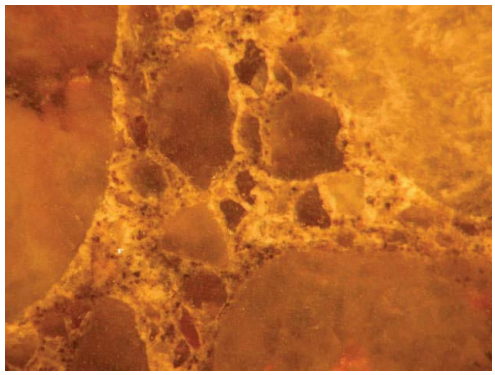
500, 800 ° C. During the fire load the density of the specimens changed, because at high temperatures the porosity of the concrete and the number of the cracks increase. Therefore, our experiments were complemented with computed tomography (CT) tests. During the tests, we proved that CT tests are clearly suitable for monitoring of material structural changes in case of concrete.

Keywords: concrete, high temperature, fire, material structural changes, CT

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

1.1 A Beton viselkedése magas hőmérsékleten

A megszilárdult beton két fő komponensből álló összetett anyag. Az *1. ábraán* kvarckavics adalékanyagú beton metszetről készített optikai mikroszkópos felvételt mutatjuk be. A felvételen jól látható, hogy a megszilárdult beton két fő összetevője az adalékanyag és a cementkő. A beton magas hőmérsékleten való szerkezeti átalakulásával kapcsolatban tudni kell, hogy a hőmérséklet emelkedésnek hatására mindkettőben változások következnek be.



1. ábra: Kvarckavics adalékanyagú beton (20 °C mikroszkópos felvétel)

A hőmérséklet emelkedésével romlanak a beton szilárdsági jellemzői. A beton a lehűlés során sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton

szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, és végezetül tönkremegy.

A beton tűzterhelés hatására bekövetkező tönkremenetele *Kordina* szerint (1997) alapvetően két okra vezethető vissza:

– a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására, illetve

– a betonfelület réteges leválására.

Jelen cikkben csak a beton kémiai átalakulásának hatását vizsgáljuk a szilárdsági és belső szövetszerkezeti jellemzőire, ezért itt elsősorban a beton belső szerkezetében lejátszódó kémiai és fizikai változásokat ismertetjük. Ezekbe beleértendőnek érezzük a melegítés során kialakuló belső mikrorepedéseket is.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ *(Thielen, 1994):*

– a cement típusától,

– az adalékanyag típusától,

– a víz-cement tényezőtől,

– az adalékanyag-cement tényezőtől,

– a beton kezdeti nedvességtartalmától,

– a hőterhelés módjától.

Magas hőmérséklet hatására a beton szerkezete megváltozik. **100 °C** körül a tömegveszteséget a makro-pórusokból távozó víz okozza. Az ettringit ($3CaOAl_2O_3•3CaSO_4•32H_2O$) bomlása **50 °C és 110 °C** között következik be *(Khoury, Graiver, Sullivan, 1985)*. **200 °C** körül további dehidratációs folyamatok zajlanak, ami a tömegveszteség újabb, kismértékű növekedéséhez vezet. A különböző kiinduló nedvességtartalmú próbatestek tömegvesztesége eltérő lesz egészen addig, amíg a pórusvíz és a kémiailag kötött víz eltávozik. A kiinduló nedvességtartalom függvényében a tömegveszteség eltérése különösen a könnyűbetonok esetén jelentős. A kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség **250-300 °C** között

már nem érzékelhető. **450 °C és 550 °C** között a nem karbonátosodott portlandit bomlása következik be ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O\uparrow$). Ez a folyamat endoterm (hőelnyelő) csúcsot és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz *(Schneider, Weiss, 1977),* ez a kémiai átalakulás a betonszilárdság csökkenéséhez, illetve az acélbetétek tapadásának jelenetős csökkenéséhez vezet. A közönséges betonok esetén a kvarc α –ból β módosulatba való átkristályosodása **573 °C**-on okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc átalakulása 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár *(Waubke, 1973),* ami a beton lényeges károsodását eredményezi, ezen hőmérséklet felett az adalékanyag határfelületén feltehetőleg mikrorepedések jelennek meg. A régi szakirodalom szerint ezen hőmérséklet fölött a beton nem rendelkezik jelentős teherbírással. **700 °C**-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat-növekedéssel és további szilárdságcsökkenéssel jár *(Hinrichsmeyer, 1987).*

A CT (komputer tomográfiás felvételeken) a sűrűség különbségeket látjuk, ebből kifolyólag a pórusrendszer változását egyértelműen felismerhető a felvételeken, ezért a bemutatjuk a beton pórusrendszerének a változását hőterhelés hatására. A kvarckavics adalékanyagú betonoknál **150 °C-ig** a cementkő porozitása, valamint az adalékanyag és a cementkő közötti kontaktzóna porozitása nő. A kontaktzónában **150 °C-ig** repedések keletkezhetnek, amit az adalékanyag és cementkő különböző hőtágulásával magyarázhatunk. A cementkő struktúrája **450 °C-ig** stabil, de mikrorepedések már ezen hőmérséklet alatt is keletkezhetnek. **450-550 °C** között azonban a portlandit bomlása miatt a porozitás megnő. Ezt követően **650 °C-ig** a cementkő felépítése nem változik. **650 °C** felett a CSH vegyületek bomlása megkezdődik, és a kapillárisok száma megnő. **750 °C** felett a pórusok átmérője nagymértékben növekszik. A különböző mikrorepedések mérete függ az adalékanyag legnagyobb szemnagyságától *(Hinrichsmeyer, 1987).*

1.2 A CT vizsgálat rövid leírása és alkalmazhatósága tűzkárosult beton esetén

Tekintettel arra, hogy a pórusrendszer a hőmérséklet emelkedésének hatására változik ezért a CT vizsgálatok alkalmasak lehetnek a hő (tűz) terhelt betonok vizsgálatára. Az alábbiakban a CT vizsgálatok menetét ismertetjük röviden. A hagyományos röntgen vizsgálatnál a testből kilépő sugárzás a filmen feketedésként jelenik meg. Minél kisebb az anyag sugárgyengítési

együtthatója, annál nagyobb sugárzás éri a filmet, így sötétebb lesz a film. A nagyobb sugárgyengítési együtthatójú anyagok esetén kisebb a testből kilépő sugárzás, ami a filmen világosabb területként jelenik meg. A komputertomográfiás (CT) felvételeken a vizsgálat tárgya szeletekre bontva látható. A CT adatmátrixból vizualizált kép első közelítésben úgy kezelhető, mint egy szeletfelbontásnak megfelelő sűrűségtérkép az adott anyagokról. Ezen a sűrűség képen jól kirajzolódnak a vizsgált tárgy különböző sajátosságai (adalékanyag szemcsék, pórusok, repedések).

A CT felvételek esetén azonban nagy hangsúlyt kell fektetni, azoknak a korrekt, mérnökök számára is használható kiértékelésére.

2. VIZSGÁLAT MÓDSZERE

2.1 Alkalmazott anyagok

A vizsgálathoz receptenként 21 darab 150 mm élhosszúságú kockát és 21 darab 70x70x250 mm-es hasábot készítettünk. A T1 és T2 összetétel zúzottkő adalékanyaggal, a T3-T7 betonreceptek kvarckavics adalékanyaggal készültek.

A kísérletek során minden recept CT vizsgálatát is elvégeztük a hőterhelt , majd eltört hasábok egyik felén.

2.2 Tűzvizsgálat és a szilárdságmérés menete

A kísérleteink során a szabványos (standard), vagyis a magasépítési szerkezetekre, és a csarnokokra alkalmazható tűzgörbéhez közeli felfűtési görbét alkalmaztunk

A próbatesteket a kizsaluzás után 7 napig vízben, majd a hőterhelésig (28 napos korig) laboratóriumi körülmények között tároltuk.

A nyomó szilárdság vizsgálatot 150x150x150 mm élhosszúságú már hőterhelt és laborlevegőn lehűlt próbakockákat ALPHA 3-3000 S típusú törőgépen törtük el. A törőgép terhelési sebessége 11,25 kN/s volt

A hajlító-húzó szilárdság meghatározásához a 250x70x70 mm-es hasáb próbatesteket központos hajlító vizsgálatnak vetettük alá. Majd a fél hasábok elnyomásával a testszilárdságot is megállapítottuk. A hasábokat is a hőterhelést követően laborlevegőn lehűlt állapotban terheltük.

A vizsgálatok során a különböző betonreceptúrák nyomószilárdságát, hajlító-húzószilárdságát és testszilárdságát vizsgáltuk a hőmérséklet függvényében. Az alkalmazott hőlépcsők: 20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C voltak.

2.3 CT mérés menete

A CT méréseket a Pécsi Egyetem Diagnosztikai és Onkoradilógia Intézetében végeztük el. A CT felvételek feldolgozása és elemzése *Matlab* környezetben írt algoritmusokkal, automatikus módon, előre beállított paraméterekkel történik. Az adalékanyagok, kötőanyagok és a pórusok szegmentálása küszöböléssel (thresholding) történt, de a CT felvételek zajossága miatt az algoritmusban képfeljavító eszközöket is alkalmaztunk. Ezek közé különböző szűrők (például átlagoló szűrő) tartoztak, valamint külön foglalkoznunk kellett a CT-re jellemző nyalábkeményedési korrekcióval is. Utóbbi a homogén anyagon áthaladó röntgensugár gyengülését hivatott korrigálni. A kialakított algoritmusok egyenként elvégzik a CT felvételeken a szegmentálást, majd elemzés után szeletenkénti térfogat százalékos statisztikákat állítanak elő. Az eredményeket táblázatos formában is rögzíthetjük, és további statisztikai számításokra is felhasználhatjuk, nem csupán szeletenként, hanem a teljes mintára vonatkozóan is. Az előállított eredmények közé nem csupán a kinyert statisztikák tartoznak, hanem a köztes lépésekben előállított szegmentált felvételek is, melyek alkalmasak a mintán belüli különböző komponensek vizualizálására.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1 Szilárdságvizsgálat eredményei

3.1.1 Nyomószilárdság vizsgálat eredményei

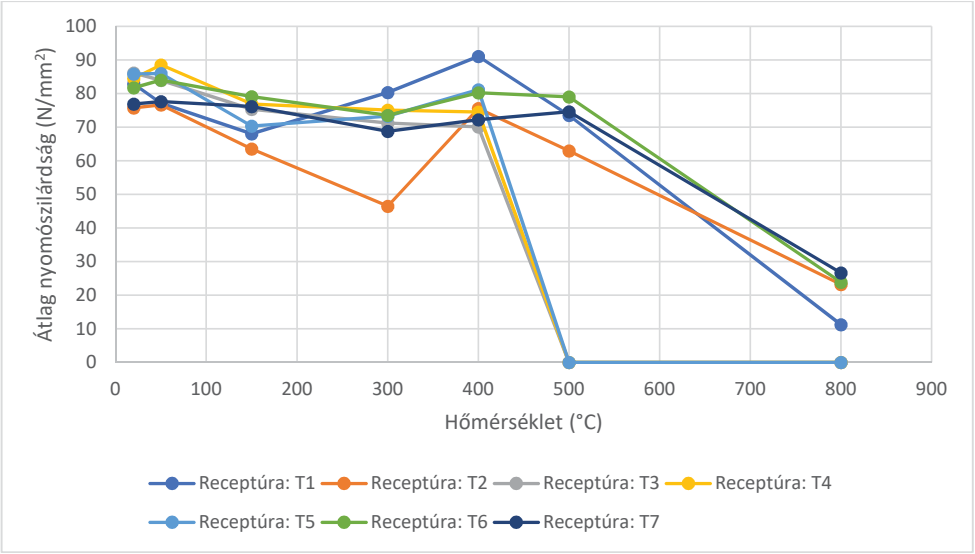
Nyomószilárdságot 150x150x150 mm élhosszúságú kockákon mértünk. A mért és a relatív nyomószilárdsági eredményeit a hőmérséklet függvényében a *3. és 4. ábra* szemlélteti.

A nyomó szilárdság alakulása minden keverék esetén hasonló volt: A betonszilárdság kezdeti csökkenése után egy átmeneti növekedést tapasztalhatunk, amit utána újabb szilárdságcsökkenés követett.

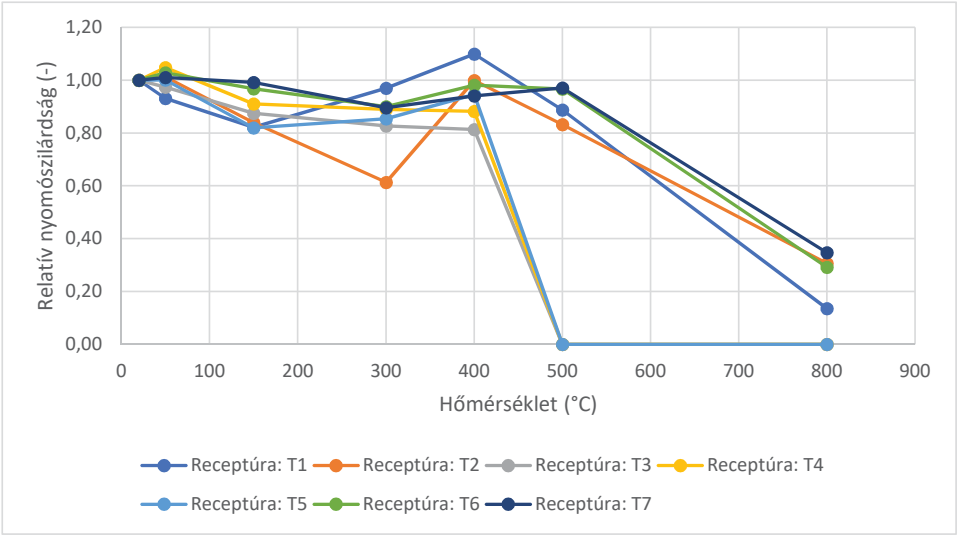
A következő eltéréseket azonban kiemelnénk:

- A lokális minimum pont helye változik, pl. a T2 recept esetén a szokásos 150 °C helyett 300 °C-nál található.

- A T3, T4 és T5 beton összetételek estén az 500 °C-os hőterhelés hatására a beton próbatestek a kemencében felrobbantak, ezért innentől szilárdságot 0-ra vettük fel. Ez arra utal, hogy a nagyelemes kísérletek során a betonfelület robbanásszerű leválásának az esélye elég nagy, tehát ezeknek a betonösszetételeknek az alkalmazása kérdéses.



3. ábra: Kockán mért átlag nyomószilárdság a hőmérséklet függvényében

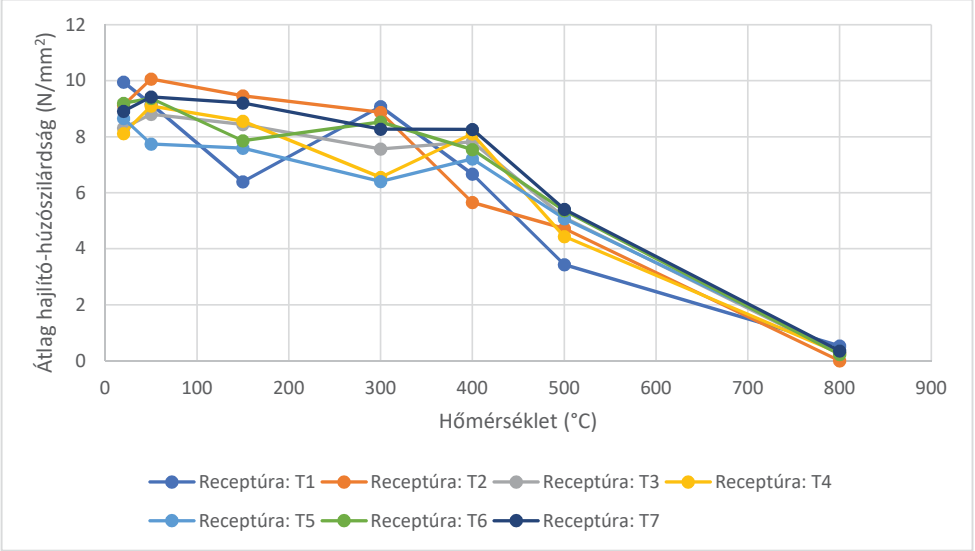


4. ábra: Kockán mért relatív nyomószilárdság a hőmérséklet függvényében

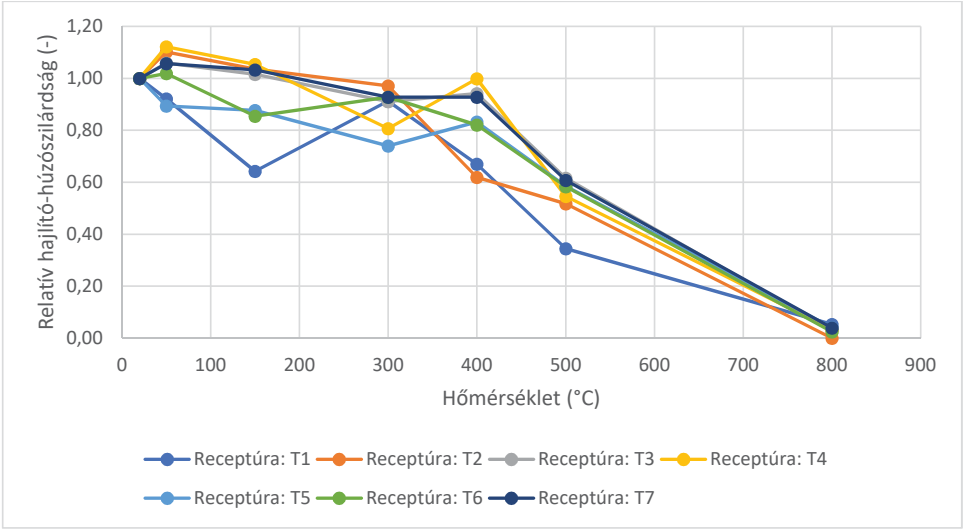
3.1.2 Hajlító-húzószilárdság vizsgálat eredményei

Hajlító-húzószilárdságot 70x70x250 mm élhosszúságú hasábokon mértünk. A vizsgált receptúrák mért és a relatív hajlító-húzószilárdsági eredményeit a hőmérséklet függvényében a *5. és 6. ábra* szemlélteti.

A hajlító-húzószilárdság alakulása minden keverék esetén hasonló volt: A hajlító-húzószilárdság csökkenése egyenletesnek mondható, minden keverék esetén.



5. ábra: Hasábon mért átlag hajlító-húzószilárdság a hőmérséklet függvényében

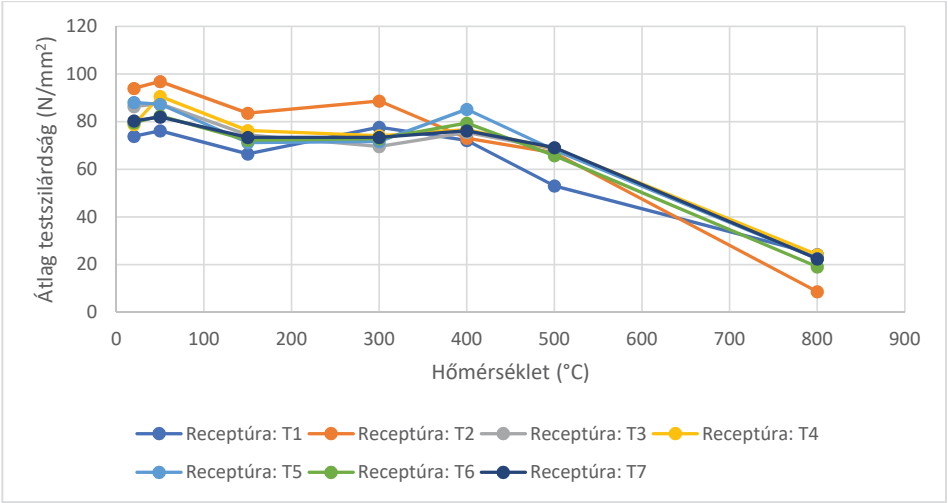


6.ábra: Hasábon mért relatív hajlító-húzószilárdság a hőmérséklet függvényében

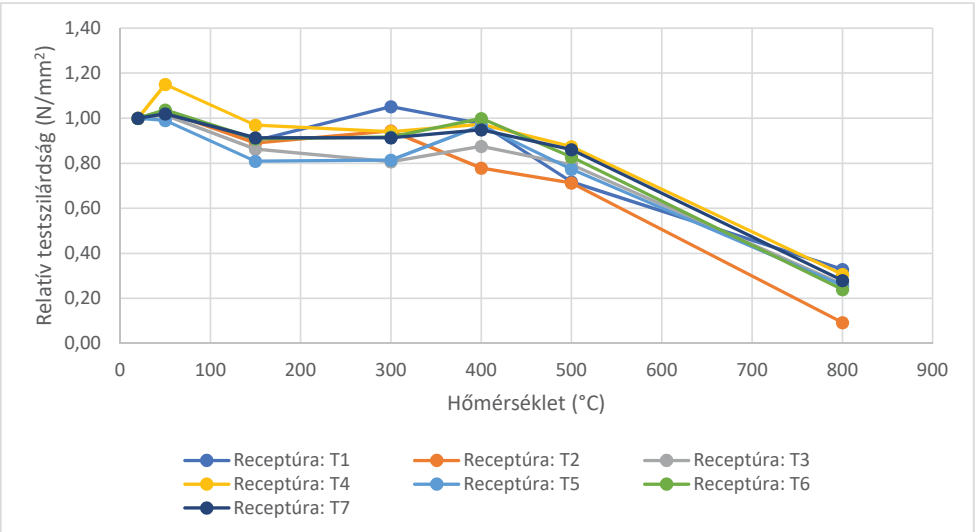
3.1.3 Testszilárdság eredmények

A betonok testszilárdságát az elhajlított hasábok egyben maradt fél hasábjain mértük 70x70 mm területű nyomólapok segítségével. A kiindulási receptúrák mért és a relatív testszilárdsági eredményeit a hőmérséklet függvényében a *7. és 8. ábra* szemlélteti.

A testszilárdság alakulása minden keveréknél azonos tendenciát mutat: A görbék között lényeges eltérés nem tapasztalható.



7. ábra: Hasában mért átlag testszilárdság a hőmérséklet függvényében

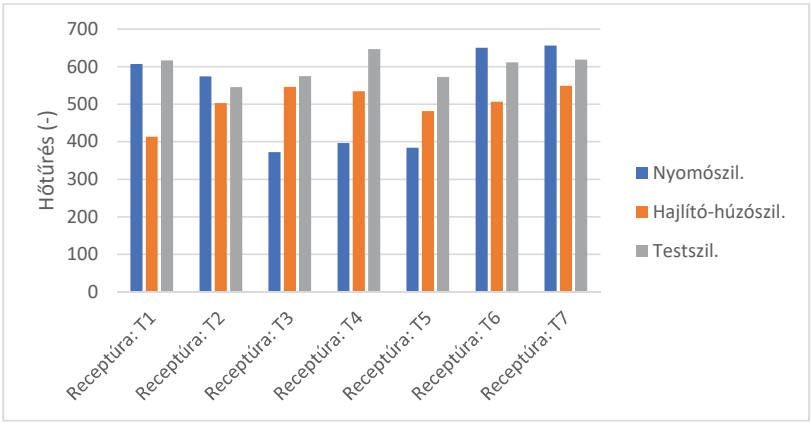


8. ábra: Hasában mért relatív testszilárdság a hőmérséklet függvényében

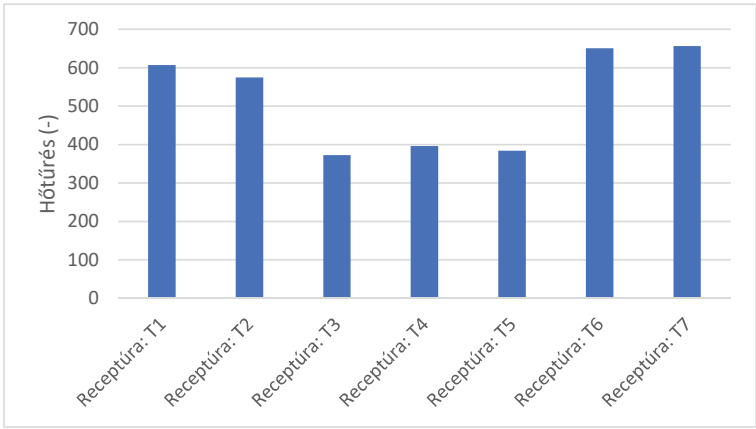
3.1.4 Hőtűrési eredmények

A betonok hőmérséklet következtében bekövetkező szilárdságcsökkenését a könnyebb átláthatóság és összehasonlíthatóság miatt gyakran a betonok hőtűrésével jellemzik. A betonok hőtűrése a relatív szilárdság-hőmérséklet görbe alatti terület kifejezve egyetlen értékben.

A vizsgált receptúrák hőtűrését a *9. ábra* szemlélteti. A *10. ábrán* a nyomószilárdságból számolt hőtűrés értéket adjuk meg. Jól látszik, hogy a nyomószilárdság szempontjából a T3, T4 és T5 betonok hőtűrése a legkisebb, amit a beton kockák felrobbanásával magyarázhatunk. A T6 és T7 betonok hőtűrése a legmagasabb a T1 és T2 betonok alacsonyabb hőtűrését az eltérő adalékanyag magyarázhatja.



9. ábra: A relatív szilárdsági adatokból számított hőtűrés a receptúrák függvényében



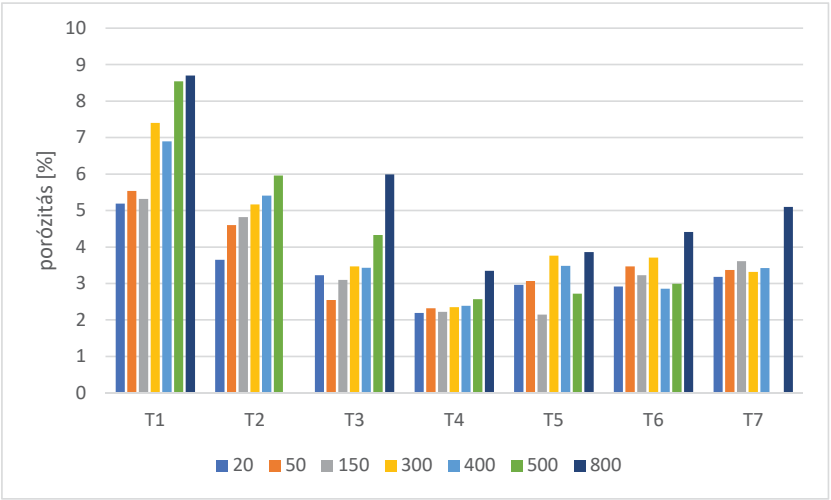
10. ábra: A relatív nyomószilárdsági adatokból számított hőtűrés a receptúrák függvényében

3.2 CT vizsgálat eredményei

A T1-T7 receptekből készült betonokon CT vizsgálatokat is végeztünk. A CT mérés előtt a próbatesteket hőterheltük (20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C), majd a hőterhelés után kihűlt állapotban végeztük el a méréseket. A CT vizsgálat segítségével az egyes próbatestek porozitását meghatároztuk a hőmérséklet függvényében. A *11. ábrán* a porozitás alakulását adjuk meg a hőmérséklet függvényében. Jól látható, hogy a hőmérséklet emelkedésének hatására a porozitás minden recept esetén növekvő tendenciát mutat, a diagramm alapján megállapíthatjuk, hogy a CT vizsgálatok alapján következtetni lehet a hőterhelés nagyságára, vagyis a károsodás mértékére.

A T1 és T2 minták esetén (zúzott kő adalékanyaggal készült betonok) a porozitás emelkedés a hőterhelés hatására itt is megfigyelhető. A zúzott kő adalékanyaggal készült betonok esetén a legmagasabb porozitás értékeket 800 °C-on határoztunk meg, ezen hőterhelés felett a porozitás értéke csak kis mértékben nőtt, ami a kvarckavics adalékanyagú betonokra nem igaz. Az eltérést az magyarázhatja, hogy 500 °C felett a kvarckavics adalékanyagú betonok esetén az adalékanyag határfelületén repedések keletkeztek a zúzott kő adalékanyagú betonok esetén nem. Ezt az adalékanyag eltérő hőtágulásával, illetve az adalékanyag eltérő felületével magyarázhatunk. Másik magyarázat lehet, hogy a kvarckavics felülete sima a zúzott kő felülete

érdes, tehát máshogy tapad, rá a cementkő és ezáltal eltérő hőérzékenységű határfelület alakulhat ki.



11. ábra: Az alapreceptek betonjának a porozitás változása a hőmérséklet függvényében

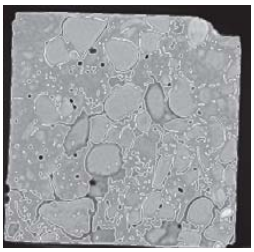
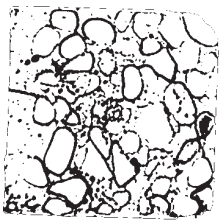
A CT vizsgálatok képi elemzése során a következő megállapításokra jutottunk *(12. ábra):*

- a T3-T7 minták esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, a cementkő elvált az adalékanyagtól,

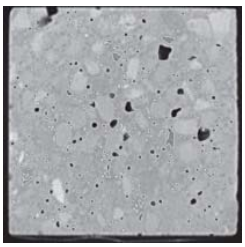
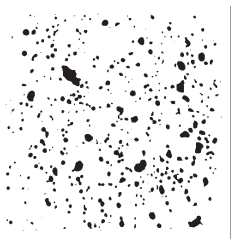
- a T1 és T2 minta esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, de a cementkő határozott elválását az adalékanyagtól nem figyeltük meg, vagyis a határfelület károsodásának mértéke kisebb volt a zúzott adalékanyagú betonok esetén

- az 500 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete károsodott, a cement kő és az adalékanyag felületén repedések keletkeztek,

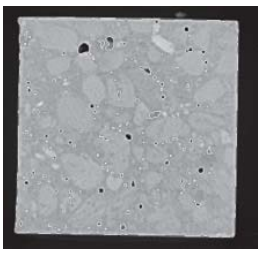
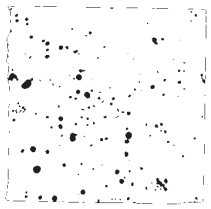
- 150 °C felett az adalékanyagok jobban szegmentálhatók, mint az alatt, ami azt jelenti, hogy ezen hőmérséklet felett a cementkő sűrűsége elkezd csökkeni.

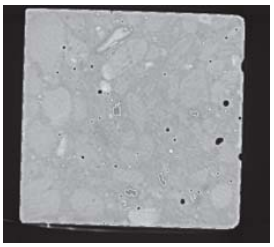
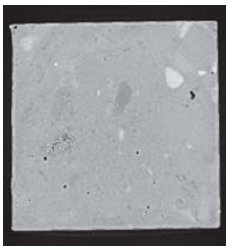
T 3 minta 800 °C hőterhelés után

T 1 minta 800 °C hőterhelés után

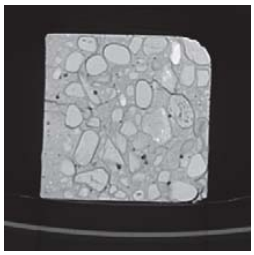



T 1 minta 500 °C hőterhelés után

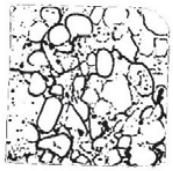



150 °C hőterhelés után 20 °C után

12. ábra: A CT felvételek képi kiértékelése



EREDETI

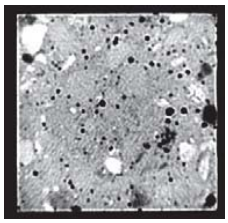


SZEGMENTÁLT PÓRUSOK

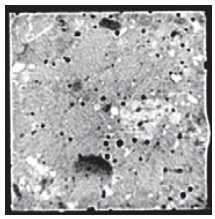
T 3 minta 800 °C hőterhelés után (azonos szeletek)

3.3 T3 recept alapján készült beton részletes elemzése

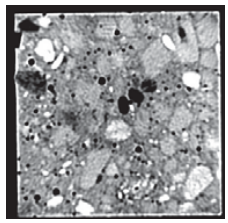
A *13. ábra* a hőterhelt próbatestekről készült CT felvételeket foglalja össze. A hőterhelés függvényében változik a próbatestekben a porozitás. Jól látható, hogy a 150, a 300 és a 400 °C-on hőterhelt próbatestek esetén megnőtt a porozitás. A 150 °C feletti hőterhelésnek kitett próbatestek esetén, a cementkő sűrűsége is megváltozott, ezek a felvételek sokkal sötétebbek, ami arra utal, hogy kisebb sűrűségű a benne lévő cementkő.



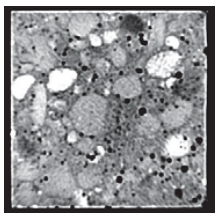
20 °C



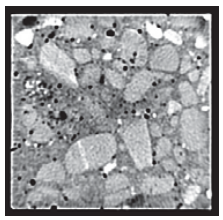
50 °C



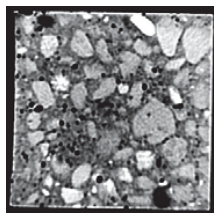
150 °C



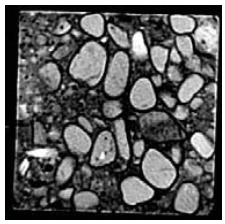
300 °C



400 °C



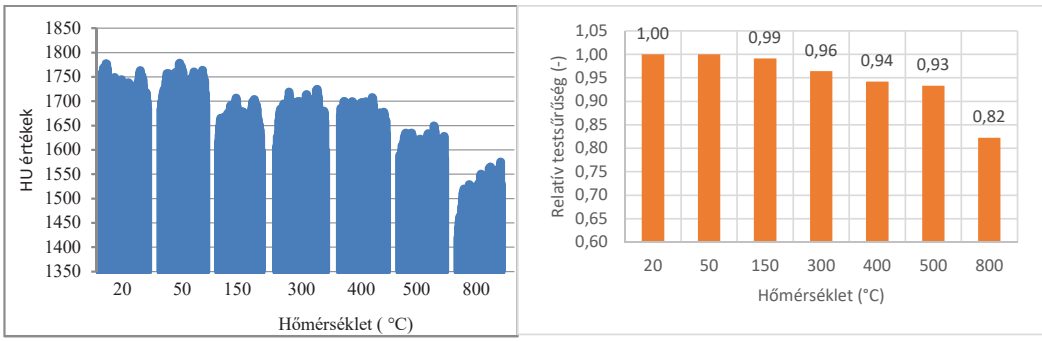
500 °C



800

13. ábra: A különböző hőmérsékleten hőterhelt próbatestekről készült felvételek

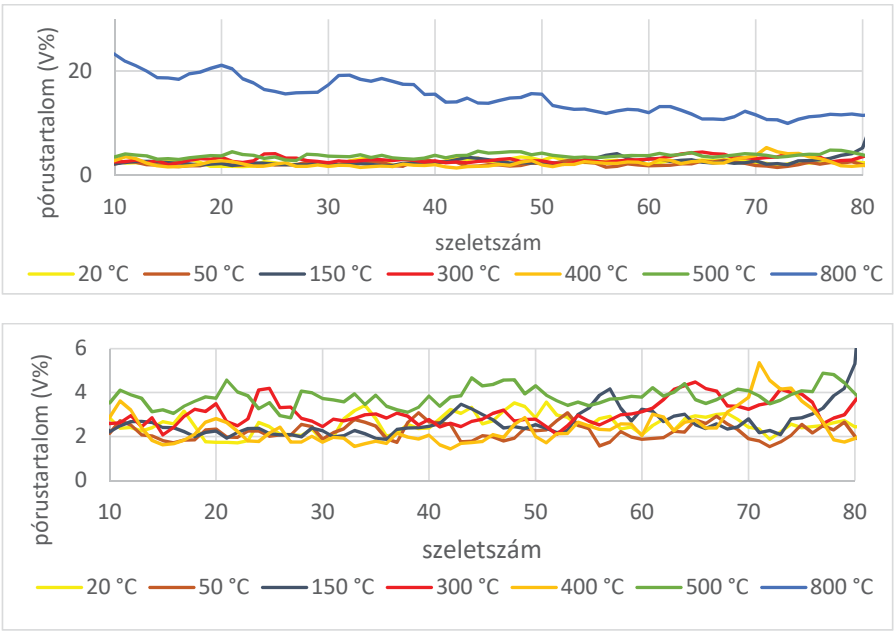
A *14. ábrán* a HU-értékek és a testsűrűség alakulását adjuk meg a hőmérséklet függvényében. Jól látható, hogy a két diagram tendenciája megegyezik, tehát a HU-értékek és a testsűrűség értékek között egyértelmű összefüggés írható fel. A testűrűség a hőterhelés hatására változik, ezért a HU- értékek és a testsűrűség alapján megállapítható a hőterhelés hőmérséklete.



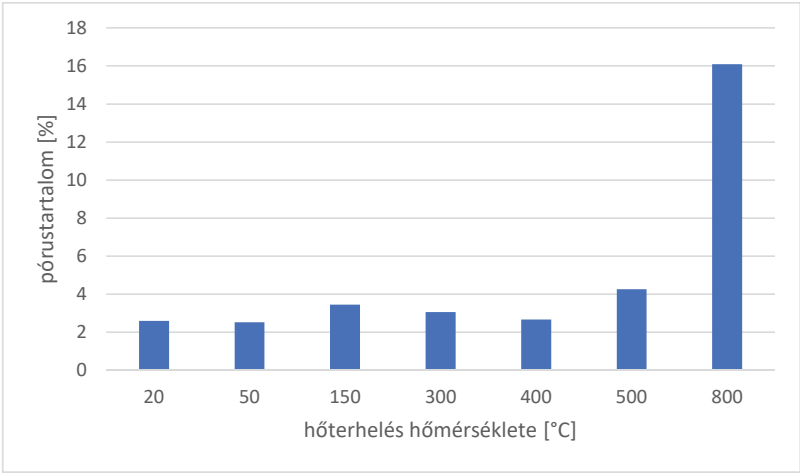
14. *ábra: A HU-értékek és a testsűrűség alakulása a hőmérséklet függvényében*

A *15. ábrán* a póruseloszlást láthatjuk a próbatestek hossztengelye mentén ábrázolva a hőmérséklet függvényében. Az ábrán jól látható, hogy 800 °C-on jelentős mértékben 500 °C-on kis mértékben növekedett meg a porozitás. Ennek magyarázata lehet a betonban kialakuló repedések és szerkezeti átalakulások lehetnek. Ezek alapján megállapítható, hogy 500 °C felett a CT mérés alkalmazható a hőterhelés hőmérsékletének megállapítására.

A *16. ábrán* az átlagos póruseloszlást adjuk meg a hőmérséklet függvényében. Megfigyelhető, hogy 300 °C, 500 °C-os hőterhelést követően a porozitás kis mértekben nő, a 800 °C-os hőterhelés követően pedig jelentős növekedést figyelhetünk meg.



15. ábra: A pórustartalom eloszlás a hossztengely mentén



16. ábra: Az átlagos pórustartalom értékek a hőmérséklet függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok során az 7 különböző beton nyomószilárdságát, hajlító-húzószilárdságát és testszilárdságát vizsgáltuk a hőmérséklet függvényében. Az alkalmazott hőlépcsők: 20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C voltak. Tekintettel arra, hogy a pórusrendszer, illetve a repedések száma a hőmérséklet emelkedésének hatására változik ezért a szilárdság vizsgálatainkat kiegészítjük a CT vizsgálatokkal is.

A nyomószilárdság szempontjából a T3, T4 és T5 betonok hőtűrése a legkisebb, amit a beton kockák felrobbanásával magyarázhatunk. A T6 és T7 betonok hőtűrése a legmagasabb a T1 és T2 betonok alacsonyabb hőtűrését az eltérő adalékanyag magyarázhatja.

A CT vizsgálatok képi elemzése során a következő megállapításokra jutottunk:

- a T3-T7 minták esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, a cementkő elvált az adalékanyagtól,

- a T1 és T2 minta esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, de a cementkő határozott elválását az adalékanyagtól nem figyeltük meg, vagyis a határfelület károsodásának mértéke kisebb volt a zúzott adalékanyagú betonok esetén,

- a hőmérséklet növekedésével a mintákon egyre szembetűnőbb a kontraszt változás: az adalékanyagok jobban elhatárolhatók, hiszen az azokat körülvevő cementkő a távozó víz, és a kiégő anyagok következtében ritkulni fog, a sűrűségkülönbségek markánsabbak lesznek.

- az átlagos póruseloszlás tekintetében megállapítható, hogy 300 °C, 500 °C-os hőterhelést követően a porozitás kis mértekben nő, a 800 °C-os hőterhelés követően pedig jelentős növekedést tapasztalható.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenálló képességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

A kutatás Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült”

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Bólyai János Ösztöndíjon keresztül kapott támogatásáért.

6. HIVATKOZÁSOK

Balázs L. Gy., Lublóy É., Földes T. (2015) Let’s look at inside by x-ray computed tomograph (CT), *Stuctural Conctere Journal* (submitted)

Balázs L. György, Lublóy Éva: Possibilities of computed tomography (CT) for diagnosis of concrete structures In: D Choi, T Tang (szerk.) 6th Int Conference of Asian Concrete Federation, 2014, pp. 34-37.

Éva Lublóy, Balázs L. György: Potencials in use of X-ray computer tomograph (CT) to study concrete, CONCRETE BETON-TECHNOLOGIE KONSTRUKCE SANACE 6, 2013, pp. 43-45.

Hinrichsmeyer, K. (1987): Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig

Khoury, G. A., et al. (2001): Fire Desgin of Concrete Materials Structures and Modelling, Proceeding of 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001

Khoury, G. A., Grainger, B. N, Sullivan P. J. E (1985): Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, Magazine of Concrete Research, Vol 37, No. 132

Kordina, K (1997): Über das Brandverhalten punktgestützter Stahbetonbalken, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Lublóy Éva, Balázs L György, Kapitány Kristóf, Barsi Árpád, Földes Tamás: Tűzkárosodott vasbetonszerkezet vizsgálhatósága CT-vel, VASBETONÉPÍTÉS 16:(4), 2014, pp. 86-90

Thielen, K. Ch. (1994): Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Waubke, N. V. (1973): Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C-Brandverhalten von Bauteilen, Dissertation, TU Braunschweig

Dr. Lublóy Éva PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

lubloy.eva@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-9628-1318

Hlavička Viktor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

hlavicka.viktor@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-5435-4400

Dr. Kapitány Kristóf, PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Photogrammetry and Geoinformatics, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

kapitany.kristof@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0003-4052-6317

A betonfelület leválásának hatása a szerkezet tűzállóságára

Effect of explosive spalling on the fire resistance of structures

Dr. LUBLÓY Éva (docens) [1], Dr. NEHME G. Salem (docens) [1], Dr. KOPECSKÓ Katalin (docens) [2], ABDELMELEK Nabil (doktorandusz)[1], HLAVIČKA Viktor (doktorjelölt)[1], Dr. BALÁZS L. György (egyetemi tanár, tanszékvezető) [1]

[1] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. K épület 185, Tel.: 463-4068 (titkárság), Fax: 463-3450, E-mail: lubloy.eva@epito.bme.hu, balazs.gyorgy@epito.bme.hu, salem.nehme@epto.bme.hu, abdelmelek.nabil@epito.bme.hu, hlavicka.viktor@epito.bme.hu Honlap: www.em.bme.hu

[2]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnikai és Mérnökgeológiai Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. K épület MF10, Tel.: 463-1447 (titkárság), Fax: 463-3006, E-mail: kopecsko.katalin@epito.bme.hu Honlap: www.gmt.bme.hu

Abstract

A betonfelületek réteges leválása komplex jelenség. Előregyártott szerkezei elemek, amik nagyobb szilárdságú betonból kisebb keresztmetszettel készülnek, érzékenyen reagálnak a hőmérséklet emelkedésére. Kísérleteink során nagyelemes tűzkísérleteket végeztünk. Jelen kutatás célja a szerkezeti elem tűzállóságának és betonfelület robbanásszerű leválásának összefüggésének kutatása volt. Összességében megállapítható amennyiben a betonfelület robbanásszerű leválása bekövetkezik, az jelentős hatással van a szerkezet tűz alatti teherbírásra.

Explosive spalling of concrete cover is a complex phenomenon. Precast elements are sensitive for high temperatures owing to their small sectional sizes. Our fire test results are presented for a large scale specimen. Objectives of present study is the analysis of the relationship between fire resistance and explosive spalling. There is a clear evidance for accelerated deterioration due to high temperatures after the loss of concrete cover.

Kulcsszavak

betonfelület leválása, betonösszetétel, szerkezeti stabilitás, betonszilárdság hőmérséklet függése

1. TŰZ HATÁSA A BETONRA

1.1 Kémiai átalakulások

A megszilárdult beton két fő komponensből, az adalékanyagból és a cementkőből álló, összetett anyag. A hőmérséklet emelkedésének hatására mindkettőben változások következnek be.

A hőmérséklet emelkedésével romlanak a beton szilárdsági jellemzői. A beton a lehűlés után sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, és végső esetben tönkremegy.

A beton tűzterhelés hatására bekövetkező tönkremenetele alapvetően két okra vezethető vissza (Kordina, 1997):

– a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására, illetve
– a betonfelület réteges leválására.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ (Thielen, 1994, Lublóy 2007, Lublóy Balázs 2009, Balázs):

- a cement típusától,
- az adalékanyag típusától,
- a víz-cement tényezőtől,
- az adalékanyag-cement tényezőtől,
- a beton kezdeti nedvességtartalmától,
- a hőterhelés módjától.

Magas hőmérséklet hatására a beton szerkezete megváltozik. A különböző hőmérsékleti tartományokban a betonban lejátszódó legfontosabb fizikai és kémiai folyamatokat röviden a következőkben foglaljuk össze:

100 °C körül a tömegveszteséget a makro-pórusokból távozó víz okozza. Az ettringit ($3CaOAl_2O_3•3CaSO_4•32H_2O$) bomlása **50 °C és 110 °C** között következik be (Khoury, Graiver, Sullivan, 1985, Kopecskó, 2006). **200 °C körül** további dehidratációs folyamatok zajlanak. A víztartalom (víz-cement tényező), a cement típusa és a beton kora befolyásolja az eltávozó pórusvíz és a kémiailag kötött víz mennyiségét. A kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség 250-300 °C között már nem érzékelhető.

450 °C és 550 °C között a nem karbonátosodott portlandit bomlása következik be ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O\uparrow$). Ez a folyamat endoterm (hőelnyelő) csúcsot, és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz (Schneider, Weiss, 1977). A portlandit dehidratációja okozza a legnagyobb szilárdságvesztést a betonban (Lublóy, 2007).

Közönséges betonok esetén a kvarc α –ból β módosulatba való kristályátalakulása **573 °C-on** okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc átalakulása 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár (Waubke, 1973), és ez a beton lényeges károsodását eredményezi. Ezen hőmérséklet fölött a beton nem rendelkezik jelentős teherbírással.

700 °C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat-növekedéssel és további szilárdságcsökkenéssel jár.

A beton kémiai, illetve fizikai szerkezetváltozásának hatására a beton szilárdsági jellemzői is megváltoznak.

1.2 Betonfelület leválása

A betonszerkezetek tűz esetén való tönkremenetelének másik oka a betonfelületek robbanásszerű leválása. A betonfelületek leválásának két oka lehet:

(1) a betonból távozó vízgőz lefeszíti a felületi rétegeket, vagy

(2) a terhelt zóna már nem tudja a hőtágulásból származó újabb erőket felvenni és elmorzsolódik, leválik (Winterberg, Dietze, 2004)

Nagyszilárdságú betonok felületének leválását általában a hőmérséklet emelkedésének hatására bekövetkező feszültségek okozzák, míg a szokványos betonok esetén általában a betonból távozó vízgőz feszíti le a felületi rétegeket. Ha a betonfelület egyik oldalát hőterhelés éri, a betonból távozó vízgőz hatására egy vízgőzzel telített réteg alakul ki, ekkor a vízgőz nyomása egyre nő, és végül lefeszíti a betonrétegeket (Lublóy, Balázs, 2009). A betonfelület réteges leválásának esélyét a következő tényezők befolyásolják:

- külső tényezők: a tűz jellege, a szerkezetre ható külső terhek nagysága;
- geometriai jellemzők: a szerkezet geometriai adatai, a betonfedés nagysága, a vasalás acélbetéteinek száma és elhelyezkedése;
- a beton összetétele: az adalékanyag mérete és típusa, a cement és a kiegészítő anyag típusa, a pórusok száma, a polipropilén száladagolás, az acél szálerősítés, a beton nedvességtartalma, áteresztőképessége és szilárdsága (Silfwerbrand, 2004).

Alagutaknál fontos, hogy a betonfelületek réteges leválása tűz esetén lehetőség szerint ne következzen be. Számos kísérlet igazolta, hogy a betonfelület leválásának veszélye műanyag szálak alkalmazásával jelentősen csökken, mivel a szálváz kiégése során létrejövő pórusszerkezet a szétrepedezés veszélyét csökkenti (Richtlinie, 2005; Dorn, 1993).

A betonfelület réteges leválását minden esetben el kell kerülni. Ezt leghatékonyabban a megfelelő betonösszetétel megtervezésével és alkalmazásával érhetjük el.

Az alagutakban teljesen más jellegű a hőterhelés mértéke, mint a magasépítési épületek esetén, ez a jellegű hőterhelés a betonfelület leválása szempontjából jóval nagyobb veszélyt jelent. Az alagutak építése során fontossá vált, hogy a betonfelület réteges leválása lehetőség szerint ne következzen be. Számos kísérlet igazolta, hogy a betonfelület leválásának veszélye műanyag szálak alkalmazása esetén jelentősen kisebb lesz. Mörth, Haberland, Horvath. és Mayer (2005) alagútelemekkel (hosszúság 11m, magasság 2 m) végzett kísérletei igazolták, hogy a polipropilén szálakkal erősített betonok felületének réteges leválása a tűz hatására nem következett be *(2-3. ábra)*.



2. ábra: Száladagolás nélkül készült alagútelem 1200°C-os hőterhelés után (Mörth, Haberland, Horvath, Mayer, 2005)



3. ábra: 2 kg/m^3 polipropilén száladagolással készült alagútelem 1200°C-os hőterhelés után (Mörth, Haberland, Horvath, Mayer, 2005)

Janson és Boström (2005) kísérletei során zömök és karcsú beton oszlopokat vizsgált különböző betonösszetétellel. Műanyag szálak alkalmazása esetén a beton összetételtől függetlenül miden esetben lényegesen csökkent a levált betonfelület nagysága.

Hasonló eredményre jutott Ausztriában egy másik kutatócsoport is (Walter, Kari, Kutserle, Lindlbauer (2005), akik síkjukban nyomott lemezeket vizsgáltak. A hagyományos betonnál tűz hatására bekövetkezett a betonfelület réteges leválása a polipropilén szálakkal erősített lemez esetében viszont nem *(4-5. ábra)*.

Lényeges kérdés azonban, hogy mindezen előnyös tulajdonságok mellett a beton szilárdsági értékeinek csökkenése se legyen drasztikus a közönséges betonhoz képest. Horiguchi (2005) szálerősíttett betonokkal végzett kísérleteket. A nyomószilárdság vizsgálatot 100 mm átmérőjű és 200 mm mags hengereken szobahőmérsékletre viszahűtve vizsgálta. A felfűtés sebesége 10°C/perc volt, a próbatesteket 1 órán át tartotta az adott hőmérsékleten. Az általa alkalmazott beton víz cement tényezője 0.3 volt (583 kg/m^3 cement adagolással). Az 1 jelű beton szálerősítés nélkül készült, a 2 jelű beton 0,5 V%- os polypropilén száladagolással, a 3 jelű beton 0,5 V%- os acélszáladagolással, a 4 jelű beton 0,25 V%- os polipropilén és 0,25 V%- os acélszáladagolással készült.

A műanyag szálak adagolásának hatására kismértékű szilárdságcsökkenés volt megfigyelhető, ezt a hatás acélszálak adagolásával elkerülhetjük.



4. ábra: Száladagolás nélkül készült lemez felülete 2 órás tűzteher után (Walter, Kari, Kutserle, Lindlbauer, 2005)



5. ábra: Műanyag száladagolással készült lemez felülete 2 órás tűzteher után (Walter, Kari, Kutserle, Lindlbauer, 2005)

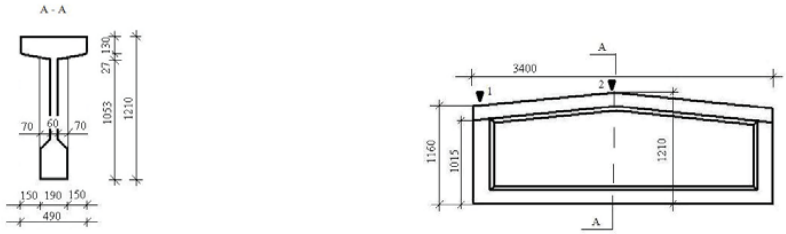
2. SZERKEZETEK TŰZÁLLÓSÁGA

2.1. Gerenda kísérletek

Előregyártott gerendák EN 1363-1: 2000 számú szabvány szerinti tűzállósági határértékét vizsgáltuk az ÉMI Nonprofit Kft. Tűzvédelmi Laboratóriumában. A kemence méretéből adódóan a gerenda teljes hosszát 3,4 m-re kellett csökkenteni, de a tartó teljes magassága megtartható volt. A vizsgált gerenda geometriai kialakítását *6. ábrán* adtuk meg.

A gerendakísérleteket a szabványos hőmérséklet-idő görbét követő tűzhatás mellett, a próbatestek minimum 90 napos korában hajtottuk végre, az alábbiak szerint:

- A kemence végfalai előtt elhelyezett segédszerkezetre feltámasztott, kéttámaszú gerendát 2 ponton (a fesztáv harmadaiban) koncentrált erőkkel terheltük a tűzhatás során.
- A vizsgálat során az előregyártott gerendákban kialakuló hőmérsékletet hőelemekkel mértük. Összesen 4 db hőelemet alkalmaztunk, 2 db a feszítőpászmákon (1. és 2. mérőpont), a gerenda hosszának harmadaiban voltak elhelyezve, illetve a másik 2 db a gerenda gerincének közepébe (3. és 4. mérőpont) került, szintén a harmadokban elhelyezve.



a) A gerenda keresztmetszete b) A gerenda oldalnézete

6. ábra: A vízszintes kemencében vizsgált gerenda geometriai kialakítása és a vizsgálat statikai elrendezése (méretek mm-ben)

A feszítőpászmákra kifejtett kezdeti feszítőerő 130 kN volt.

Beton jele: C40/50-XC2-16-F4 volt.

Betonacél jele: B60.50 (S500B) volt.

Feszítőpászma jele: FP-100/1770-R2 (MSZ EN 10138) vagy FP-93/1860 volt.

A vizsgálat során tett megfigyeléseink a következők voltak:

00. perc:	A vizsgálat kezdete.
12. perc:	A gerenda gerincéből jelentős hanghatás kíséretében nagy darabokban, robbanásszerűen vált le a betonfedés, és a gerenda elvesztette teherbíró képességét *(7 ábra).*
14. perc:	A betontakarás a gerincről folyamatosan levált.
15. perc:	A vizsgálat vége.



7. ábra: A gerenda

Megjegyzés: A vizsgálatot követően láthatóvá vált, hogy a szerkezet gerincén lévő betonfedés majdnem teljes egészében levált. A gerenda a teherbíró képességét feltehetően emiatt veszítette el. A betonfelületek lerobbanása a vékony gerinc és a betonösszetétel helytelen megválasztása miatt következett be.

2.1. Vasbeton fal kísérletek

Előregyártott gerendák EN 1363-1: 2000 számú szabvány szerinti tűzállósági határértékét vizsgáltuk az ÉMI Nonprofit Kft. Tűzvédelmi Laboratóriumában.

A vizsgálat során tett megfigyeléseink a következők voltak:

00. perc: A vizsgálat kezdete.
04. perc: Pattogó hang hallható a tűztér felől (a betonfedés elkezd leválni)
11. perc: Füst szivárog a függőleges illesztéseknél
24. perc: A füst szivárgás felerősödik.
39. perc: Repedések jelenek meg a panel külső felületén.
109. perc: A vizsgálat megszakítása bizonysági okokból.



a) b) c)

8. ábra: A falpanel elemek károsodása a tűz után

A *8. ábrán* a falpanel elemek láthatóak a tűzvizsgálat után. A fal panelelemeken a betonfedés levált. A betonfedés leválásnak oka a beton nagy szilárdsága (C 30/37) és az alkalmazott cementtípus (CEM I 52,5 R) volt. A *8.a ábrán* a legfelülre beépített elem látható, ennek az elemnek volt a legkisebb a károsodása. Az *8.c ábrán* a legalsó elem látható, ennek volt a legnagyobb mértékű a károsodása, amit azzal magyarázhatunk, hogy ezt az elemet érte a legnagyobb terhelés.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A betonfelületek réteges leválása komplex jelenség. Az előregyártott szerkezeti elemek a nagy betonszilárdság és a vékony keresztmetszetek miatt érzékenyen reagálnak a hőmérséklet emelkedésére. Kísérleteink során nagyelemes tűzkísérletet végeztünk.

Gerendakísérletek: A gerendakísérlet eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy a gerinc betonfedésének leválása esetén a betonösszetételre, valamint a nedvességtartalomra és nem a terhelés mértékére volt visszavezethető. A betonfedés korai leválása a szerkezeti elem tönkremenetelét okozta. Ebben az esetben a gerenda 12 perc után tönkrement, mivel az acélbetétek a betonfedés leválása után gyorsan átmelegedtek és ezzel egyidejűleg a gerenda elvesztette a teherbírását.

Falvizsgálatok: A fal panelelemeken a betonfedés levált. A betonfedés leválásnak oka a beton nagy szilárdsága és az alkalmazott cementtípus volt. A legfelülre beépített elemnek volt a legkisebb a károsodása. A legalsó elemnek volt a legnagyobb mértékű a károsodása, amit azzal magyarázhatunk, hogy ezt az elemet érte a legnagyobb terhelés. A betonfedés korai leválása a szerkezeti elem jelentős deformációját és ezzel a korai tönkremenetelét okozta.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNITÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázat és a Bolyai János Ösztöndíjon keresztül kapott kutatási támogatásért.

5. HIVATKOZÁSOK

Horiguchi, T. (2005), Combination of Synthetic and Steel Fibres Reinforcement for Fire Resistance of High Strength Concrete, procedings of Central Europan Congress on Concrete Engneering 8.-9. Sept. 2005 Graz pp.: 59-64

Janson, R., Boström, L. (2004), Experimental investigation on concrete spalling in fire, proceding for Fire design of concrete structures:What now?, What next? December 2-3, 2004

Khoury, G. A., et al. (2001): Fire Desin of Concrete Materials structures and modelling, Proceeding of 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001

Dorn, T. (1993): „Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Träger- Stützen Anschlüsse”, Heft 99, Braunschweig

Kordina, K (1997): „Über das Brandverhalten punktgestützter Stahbetonbalken“, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Kopecskó, K. (2006): „Cementklinkerek és cementek kloridion megkötő képessége”, PhD értekezés, BME

Lublóy, É. (2007): „Tűz hatása betonszerkezetek anyagaira”, Doktori értekezés, BME

Lublóy, É., Balázs, L. Gy., (2009), „Vasbetonszerkezetek viselkedése magas hőmérsékleten” VASBETONÉPÍTÉS 2009/4, pp. 113-119

Mörth, W., Haberland Ch., Horvath J., Mayer A. (2005), Behaviour of Optimized Tunnel Concrete with Special Aggregates at High Temperature, procedings of Central Europan Congress on Concrete Engneering 8.-9. Sept. 2005 Graz pp.: 41-50

Richtlinie (2005): “Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ Wien ÖVBB

Schneider, U., Weiß, R. (1977), „Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen, Cement and Concrete Research, Vol 11, pp. 22-29Thielen, K. Ch. (1994): „Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung)”, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Silfwerbrand, J. (2004): Guidelines for preventing explosive spalling in concrete structures exposed to fire, Proceedings of Keep Concrete Attractive, Hungarian Group of fib. 23 25 Mai 2005, Budapest University of Technology and Economics, Budapest: 2005, pp. 1148-

1156. - ISBN 963 420 837 1Waubke, N. V. (1973): „Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C-Brandverhalten von Bauteilen”, Dissertation, TU Braunschweig

Walter, R., Kari H., Kutserle W., Lindlbauer W. (2005), Analysis of the Load-bearing Capacity of Fibre Reinforced Concrete During Fire, procedings of Central Europan Congress on Concrete Engneering 8.-9. Sept. 2005 Graz pp.: 54-59Waubke, N. V. (1973): „Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C Brandverhalten von Bauteilen”, Dissertation, TU Braunschweig

Winterberg, R., Dietze, R. (2004): “Efficient passive fire protection systems for high performance shotcrete”, Proceeding for the Second International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Cairnis, Australia, October, 2004 ISBN: 0415358981

http://www.b-b-t.ch/produkte/kunststoff3.htmle

Előregyártott beton elemek betonjának fagyállósága

Freeze-thaw resistance of the concrete of precast elements

Dr. NEHME G. Salem[1a]-JAKAB András[1b] - Dr. habil LUBLÓY Éva[1c]-
Dr. KOPECSKÓ Katalin[2d]- SINKA Alex[3e]- SZIJÁRTÓ Anna[4f]-Dr. habil BALÁZS L. György[1g]

[1]BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék
1a) salem.nehme@epito.bme.hu, 1b) jakab.andras@epito.bme.hu
1c) lubloy.eva@epito.bme.hu, 1g) balazs.gyorgy@epito.bme.hu,
[2]BME, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék 2d) kopecsko.katalin@epito.bme.hu
[3]TPA HU Kft., 3e) sinka.alex93@gmail.com, [4]BME, MSc hallgató 4f) anna.szijarto.bme@gmail.com

Összefoglaló
Az előregyártott betonok fagyállósága kiemelt szerepet játszik a használati élettartam tervezésben. Vizsgálatainkban előregyártás során felhasznált betonokat vizsgáltunk. A vizsgálatokhoz szabványos próbatesteket készítettünk és szabványos fagyállósági vizsgálatokat végeztünk rajtuk. Az eredmények alapján környezeti osztályokba soroltuk az egyes betonokat. A kutatás célja az előregyártott szerkezeti elemek fagyállóságának fokozása a betonreceptúra és a gyártástechnológia figyelembevételével.
Kulcsszavak
fagyás-olvadási ellenállás, előregyártott beton, beton leromlás, betonösszetétel

Abstract
The freeze-thaw resistance is a main issue in the Service Limit State design of precast concrete. Standardized laboratory research was carried out to investigate the freeze-thaw resistance of the precast concrete. Based on the experimental results the concrete mixtures are classified into exposure classes. The main intention of the research is the enhancement of the freeze-thaw resistance of the precast concrete elements considering the concrete mixtures and production technology.
Keywords
freeze-thaw resistance, precast concrete, concrete deterioration, concrete composition

1. FAGYÁS A BETONBAN

1.1 Bevezetés

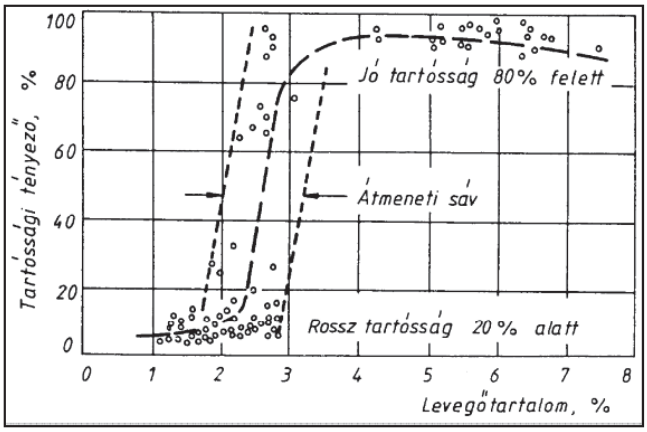
Hazánkban a téli időjárás viszonyai alapján a betonokat az európai országok, illetve területek legnagyobb károsodásokat előidéző éghajlati körzetei közé tartozóknak kell tekintenünk, legalább is a sózásos fagyasztások károkozás esetén. Az észak európai országok területeinél, az erős és hosszantartó alacsony hőmérséklet sokkal kevesebb kárt okoz, mint Magyarországon a fagy utáni felmelegedés, melyet sokszor ismétlődő fagy követ. Évente legalább 10 fagyhullámra kell számítani (amikor a forgalom zavartalan fenntartása érdekében a hó vagy jégrétegeket sózzák is) a magyarországi utakon és az autópályákon. Ezek a fagyhullámok a magyarországi betonjainkat és a kültéri szerkezetek pl. hidak is igénybe veszik és amennyiben a betonnak nincs megfelelő védelme, akkor az időjárásnak kitett betonokat a fagy károsíthatja.

1.2 Fagy hatásmechanizmusa

Közismert, hogy a víz jéggé alakulása 9 V% növekedést okoz. A fagyasztás és az olvasztás után a jég tágulása maradó alakváltozást okoz, amely mértéke a cement fajtától is függ [6].
A telítési tényező (TT), olyan arányszám, amely a tömeg szerinti vízfelvétel százalékban kifejezett értéke fokozatos víztelítéssel (8-10 nap) valamint a tömeg szerinti vízfelvétel százalékban kifejezett értéke 15 N/mm^2 nyomáson (24 óra alatt) arányával határozható meg. Az ASTM szerint a fagyálló betonokhoz a TT = 0,75 kell legyen. A telítési vizsgálatot Erdélyi 1973-ban elemezte [5].
Természetesen „a beton szilárdsága és tartóssága a beton struktúrájától függ, amit elsősorban az alapanyagok és ezek keverési arányai, valamint a tapadás – a cementkő és az adalékanyag között – befolyásolják. Végül a cementkő pórustartalma, a pórusmérettel és a póruseloszlással fejti ki hatását a szilárdságra és a tartósságra” [8].
A pórusrendszer kialakulása elsősorban a péptelítettség mértékétől függ: mind a túltelített, mind a telítetlen beton porozitása nő a péptelített betonéhoz képest. Az első esetben a kialakuló kapilláris porozitás, második esetben a légzárványok miatt [3]. A nagyobb porozitás függ a pépigénytől, amit befolyásolnak az adalékanyagok szemmegoszlása és a váz geometriai jellemzői.
A fagyhámlás elsődleges oka, hogy a meg nem fagyott sóoldat jelenléte miatt a vízjég megreped és a repedés tovább terjed a megszilárdult cementkőbe [11].

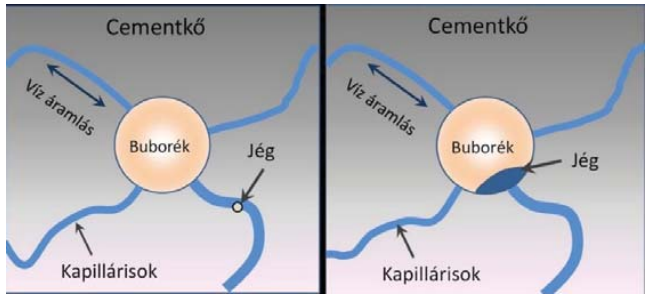
1.3 Fagyállóság

Meghatározó jelentőségű a frissbeton levegőtartalma, ennek ugyanis nagy hatása van a beton tartósságára. Cordon és Merrill [4] vizsgálataik alapján a beton faggyal szembeni ellenállására jellemző tartóssági tényező és a frissbeton levegőtartalma között összefüggés áll fenn, ami az 1. ábrán látható.



1. ábra: *A beton tartóssági tényezője a frissbeton levegőtartalmának függvényében [7]*

Setzer [10] termodinamikai modelljében a vízdiffúzió hatást mikrojéglencse pumpálásnak nevezi. Minden lehűlés alkalmával az összehúzódó gélpórusokból a megnövekedett nyomás hatására víz „pumpálódik” a kapilláris pórusokba, és az ott lévő jéglencsét növelve megfagy. Minden felmelegedés során a gélpórusrendszer tágul, visszaáll az eredetihez közeli nyomásállapot, a gélpórusokban a nyomás csökken, aminek a hatására azok vizet vesznek fel azokból a kapillárisokból, amelyben még van meg nem fagyott víz. Így alakul ki a „fagy-pumpálás” mindaddig, amíg a kapilláris pórusokban a kritikus víztelítettség létre nem jön. (A jelenség szemléltetése az 2. ábrán látható.) Ez magyarázza a kapilláris pórusok szerepét a fagyás-olvadás folyamatában, és indokolja a kapilláris pórusok mennyisége korlátozásának szükségességét a beton fagyállósága érdekében.



2. ábra: *A fagypumpálás jelensége [9]*

1.4 Sózás hatása a fagyállóságra

A téli sózás hatására a beton felületén lévő jég vagy hó megolvad. A hó és jég az olvadásához szükséges hőenergiát a környezetéből vonja el, így a beton belsejében, a pórusokban levő víz is hőt ad le, ezért megfagyhat. Tehát ilyen estben a beton mélyebb rétegében (2-5 cm) levő víz is megfagy. Ez a víz azért tud megfagyni, mert itt a só oldatkoncentrációja alacsonyabb, mint a felső rétegben. A sózásnál kialakuló fagyasztási és hűtési sebesség lényegesen meghaladja az időjárási körülmények változásának hatására létrejövő hőmérséklet csökkenés sebességét és ez okozza a beton réteges leválását, letörését. Ilyen gyors fagyasztás az időjárási körülmények hatására nem jön létre.
„A betonban a sóoldat koncentráció nem egyenletes. A legfelső porózus (cementdúsabb) rétegekből a megelőző sózásokból visszamaradó sót az eső kimossa; e vízzel telített réteg fagyáspontja körülbelül 0 °C. Alatta egy sóban dús réteg következik, amelynek fagyáspontja alacsonyabb. Ez alatt újból kisebb sótartalmú réteg következik, amelynek fagyáspontja ismét nagyobb. Sózáskor, hirtelen hőfokeséskor a beton legfelső és harmadik rétegében található víz megfagy, a közbensőé nem. Ha a levegő tovább hűl, a sókoncentrációra és pórusméretre jellemző hőmérsékleten megfagy a közbenső réteg is, és ennek a rétegnek jég vagy kapilláris nyomás, amely együtt is felléphet, lerepeszti a felette lévőt" [2].

2. LÉGBUBORÉK A BETONBAN

2.1 Légbuborékképző adalékszerek

Két fajta légbuborékképzőadalékszer van, műgyanta alapanyagú és szintetikus légbuborékképző adalékszer. Korábbi kísérleti eredmények alapján a légbuborékképző adalékszereken kívül, minden más összetevője megegyezett a keverékeknek (v/c=0,45, 365 kg/m^3 cementtartalommal). A frissbeton légtartalmát 2,5-4,5 % között 0,5%-os lépésekben határozták meg, valamint egy légbuborékképző adalékszer nélküli, etalon betont is készítettek. A frissbeton roskadási értéke alacsony volt (25,4 mm), ami pályabeton készítésére alkalmas betont képvisel. A henger alakú próbatesteket gyors fagyási és olvadási ciklusoknak tették ki tiszta, jégolvasztó sómentes vízben. A próbatestek rezonancia frekvenciájának változását (dinamikus rugalmassági modulus) vizsgálták ASTM C 215 [1] szerint. A neutralizált Vinsol műgyanta alapú légbuborékképző adalékszer esetében a légbuborékok száma fele, harmada volt a szintetikus adalékszerhez képest. A fajlagos felület tekintetében a Vinsol műgyanta alapú adalékszer esetében minden próbatest a kívánt fajlagos felület érték (24 mm^2/mm^3) alatt volt, a szintetikus adalékszer esetében egy próbatestet kivéve az összes magasabb értéket mutatott.
A távolsági tényező (spacing factor) műgyanta alapú adalékszer (VR AEA) esetében magasabb, 1,5-szer, 2-szer nagyobb volt, mint a maximális érték (0,2 mm), ezzel szemben a szintetikus adalékszerrel (SYN AEA) készített próbatesteknél a maximális érték (0,2 mm) alatt maradt, azt az egyet kivéve, amelynek a fajlagos felülete kisebb volt az előírtnál.

3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

3.1 Kísérleti terv

Az átfogó laboratóriumi kísérletben 3 típusú cement, 4 cementadagolás, 4 víz/cement tényező több kiegészítő anyag és különböző mennyiségben folyósító adalékszert hatását is vizsgáltuk. Folyósító adalékszernek MC Powerflow 2695-t alkalmaztunk. Egyes receptúrák esetében alkalmaztunk továbbá Avers Concrix makró műanyag szálakat is. A receptúrákban csak egy alkalommal alkalmaztunk légbuborékképző adalékszert Mapei AE 20-t. Az 1. táblázat tartalmazza a kutatásban szereplő kísérleti változókat.

1. táblázat: *A kutatás kísérleti változói*

Cement	CEM I 52,5 R, CEM I 42,5 N-SR0, CEM II/A-S 42,5 N
Cementtartalom	400, 430, 447, 450 kg/m^3
v/c tényező	0,4; 0,41; 0,42; 0,45
Kiegészítő anyagok	mészkőliszt (60 kg/m^3), metakaolin (30 kg/m^3), szilikapor (30 kg/m^3)
Folyósítószer	0,40 m%, 0,45 m%, 0,60 m%
Légbuborékképzőszer	0,14 m% (csak az etalon recept)
Műanyag makrószál	CEM I 52,5 R recepteknél (kivéve A-ML-29)

3.2 Receptúrák

A 2. táblázatban található receptúrák 1 m^3-re vannak megadva. A recepúrákban a víz mennyisége állandó volt kismértékben változtattuk csak a cement mennyiségét. Az adalékanyag mennyisége is állandónak mondható, egy nagyobb különbség van az első receptúra esetén. Makro műanyagszálat csak a CEM I 52,5 R-es portlandcement esetében alkalmaztunk.

2. táblázat: *A receptúrák*

Receptúrák sorszáma	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Cement fajta	CEM I 52,5R				CEM I 42,5N-SR0			CEM II/A-S 42,5N	
Cement [kg/m^3]	430	447	430	430	400	400	400	450	450
Mészkőliszt [kg/m^3]	60	29	60	--	60	--	--	--	--
Metakaolin [kg/m^3]	--	--	--	30	--	30	--	30	--
Szilikapor [kg/m^3]	--	--	--	--	--	--	30	--	30
Víz [kg/m^3]	181	183	181	181	180	180	180	180	180
Szál [kg/m^3]	3	--	3	3	--	--	--	--	--
Légbuborékképző [kg/m^3]	0,6	--		--	--	--	--	--	--
Adalékanyag [kg/m^3]	1623	1789	1706	1730	1743	1766	1766	1757	1757

3.3 Fagyhámlás

A fagyhámlás vizsgálatot az MSZ EN 1338:2003-as és MSZ CEN/TS 12390-9-es szabványok alapján végeztük el. A vizsgálat során lemért és m^2-re megadott fagyhámlási veszteségeket a 3. összevont táblázat tartalmazza. Fagyállósági szempontból a 3. recept felelt meg leginkább, ahol még 56 ciklusnál is csak 71 g cementkő vált ki a felületből. Ezen összetétel során CEM I 52,5 R rapid cementből készült betonhoz szálakat, valamint mészkőlisztet alkalmaztunk.

Látható, hogy a receptúrák közül több keverék is (3. és 7. receptúra) jobb fagyás ellenállást mutat, mint a légbuborékképző adalékszerrel készített 1-es receptúra. Ennek oka a száladagolás jótékony hatása a fagyhámlási veszteségre, valamint a szilikapor tömítő hatása, ami növeli a vízzáróságot.

3.4 Bemerítéses kockavizsgálat

A bemerítési kockavizsgálatokat MSZ EN 12371:2002-es szabvány alapján végeztük. A vizsgálatban alternatív vizsgálatot jelent a szilárdsági vizsgálat, amikor a fagyhatással tesztelt próbatesteket fagyásnak ki nem tett etalon próbatestek szilárdsági eredményeivel hasonlítjuk össze. A 3. táblázatban lehet látni a szilárdsági összehasonlításokat. A CEM I 42,5 N-SR0 cementből készült cementek többsége nem felelt meg a legkisebb XF1-es követelményeknek sem. A többi receptúra viszont teljesítette a követelményeket az XF4-es környezeti osztályhoz. Kérdéses, hogy légbuborékképző adalékszerrel készített beton esetében az alternatív módszert figyelembe szabad-e venni a minősítés során, ugyanis a pórustartalom növekedésével csökken a szilárdság is. Az XF4, XF2 és XF1 környezeti osztály határértéke legfeljebb 15, 20 és 25%-os szilárdság csökkenést jelenthet.

1. táblázat: *Fagyhámlás g/m^2-ben és bemerítéses alternatív vizsgálat során kapott eredmények*

Fagyhámlási veszteség [g/m^2]					Bemerítés nyomószilárdság csökkenés [%]	
Receptúrák	**7 ciklus**	**14 ciklus**	**28 ciklus**	**56 ciklus**	**50 ciklus**	**100 ciklus**
1	132,7	165,5	189,3	223,3	23,2	10,81
2	48,4	117	618,1	996,0	18,11	47,30
3	6,4	14,8	36,0	71,4	6,95	17,98
4	55,4	141,8	254,2	326,5	19,08	34,37
5	924,4	2744,4	6086,2	9113,9	44,40	46,93
6	452,7	1114,5	1577,3	2383,4	38,89	37,89
7	13,5	29,8	53,8	80,6	26,2	27,5
8	168,6	477,0	1587,6	2229,2	14,24	51,29
9	71,3	229,5	405,0	631,0	21,10	32,8

3.5 Környezeti osztályok

A fagyás-olvadás állóság vizsgálatok minősítése a 4798:2016-os szabvány alapján végeztük el. Az 5. táblázat alapján látható, hogy CEM I 52,5 R cementből készült betonok esetében az XF4-es követelmények teljesülnek, azonban az előregyártásban még alkalmazott CEM I 42,5-es és a CEM II/A 42,5-es cementek esetében a követelmény teljesülése nem egyértelmű. Ezen betonok esetében meg kell vizsgálni, hogy légbuborékképző adalékszer alkalmazható-e – alkalmazása ugyanis gyártástechnológia függő – a bevitt adalékszerrel jobb fagyás-olvadási ellenállás érhető el. N.F.M. jelentése: nem felelt meg.

5. táblázat: *Fagyasztásos vizsgálatok értékelésének összesítése*

Beton receptúrák	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Fagyhámlás	XF4	XF4	XF4	XF4	n.f.m.	n.f.m.	XF4	n.f.m.	XF4
Bemerítéses fagy 50 ciklus	XF1	XF2	XF4	XF2	n.f.m.	n.f.m.	n.f.m.	XF4	XF1
Bemerítéses fagy 100 ciklus	XF4	n.f.m.	XF2	n.f.m.	n.f.m.	n.f.m.	n.f.m.	n.f.m.	n.f.m.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az előregyártott betonból készült szerkezeti elemek gyakran földbe helyezett csatornaként alkalmazzák, ivóvíz, szennyvíz szállítására. A magasépítésben alkalmazott előregyártott elemek az esetek többségében szigeteléssel védettek a víz hatásától. Jelen kutatásban látható, hogy az előregyártás során alkalmazott betonok esetében a CEM I 52,5 R (rapid) cementből készült betonok számítanak fagyállónak, míg a többi beton esetében kisebb fagyállóságot lehetett kimutatni. A vízzáróság szempontjából a heterogén cementek jobban eredményeket mutattak metakaolin kiegészítőanyaggal, ez által a szétfagyás lehetősége lecsökken.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNITÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

6. HIVATKOZÁSOK

[1] ASTM C 215 „ASTM C 215 Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens”
[2] Balázs Gy. – Tóth E. (1997): „Beton- és vasbeton szerkezetek diagnosztikája, I. általános diagnosztikai vizsgálatok”, Műegyetemi Kiadó 1997.
[3] Balázs Gy. – Erdélyi A. – Kovács, K. (1990): „Fagy és olvasztósók hatása a beton tartósságára”,Építőanyag XLII. évf. 1990. 2. szám..
[4] Cordon és Merrill (1963): Requirements for freezing and thawing durability for concrete. Proc.ASTM 63, 1026-1035
[5] Erdélyi A. (1973): „A beton fagyállóságának megítélése közvetett és közvetlen mérőszámokalapján, Mélyépítéstudományi Szemle 1973, 8, 367-371.
[6] Jungwirth, D., Beyer, E., Brübl, P. (1986): Dauerhafte Betonbauwerke, Beton Verlag GmbH, Düsseldorf
[7] Mindess, S., Young, J. F. (1981): Concrete. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
[8] Nehme S. G. (2004): „A beton porozitása” doktori disszertáció
[9] Nehme S.G. (2013): Betontechnológia előadás, BME, MSc Szerkezetépítő ágazat
[10] Setzer, M. J., (1987): „Einwirkung von Kohlenoxid, Schwefeldioxid und Wasser auf Beton Langzeitverhalten und Instandsetzen von Ingenieurbauwerken aus Beton”, Fachtagung 10/11. März 1987 Bayerische Bauindustrieverband a. V. München und Baustoffinstitut der Technischen Universität München, pp. 2-9.
[11] Valenza, J.J., Scherer, G.W. (2007): Mechanism for salt scaling of a cementitious surface, Materials and Struktures, Volume 40, Issue 3, pp 259–268.

BETONOK OLDÓDÁSOS KORRÓZIÓJA – SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

DOI: 10.32969/VB.2019.3.1

2. RÉSZ: A CEMENT KÖTŐANYAGÚ BETONOK AGRESSZÍV, SZERVETLEN ANYAGOK OKOZTA OLDÓDÁSOS FIZIKAI, KÉMIAI KORRÓZIÓJA

Dr. Balázs L. György – Dr. Kausay Tibor – Dr. Kopecskó Katalin – Dr. Nemes Rita – Dr. Nehme Salem G. – Dr. Lublóy Éva – Dr. Józsa Zsuzsanna – Dr. Arany Piroska

A megszilárdult betonnal, betontermékkel, vasbeton és feszített vasbeton szerkezeti elemmel érintkező lágyvizek és agresszív vizek, folyadékok, gázok, gőzök, permetek, erjedő anyagok a cement kötőanyagú betonok oldódásos korrózióját okozhatják. Cikksorozatunknak e folyóirat 2017. évi 3. számában megjelent 1. részében (Balázs et al., 2017) a vizek és folyadékok kémhatásának, a víz keménységének és széndioxid- (szénsav-) tartalmának fogalmát, valamint a betonoknak a vizek savassága és agresszív széndioxid- (szénsav)-tartalma okozta – olykor a karbonát-keménységgel (változó keménységgel) is befolyásolt – korrózióját elemeztük a szakirodalom alapján. Cikksorozatunk 2. részében a lágyvizek, a szervetlen anyagok okozta oldódásos betonkorrózió szakirodalmát tekintjük át.

Kulcsszavak: beton, oldódásos korrózió, fizikai korrózió, kémiai korrózió, lágy víz, kilúgozódás, szervetlen savak, szerves savak, savkorrózió

1. BEVEZETÉS

A megfelelő adalékanyagú betonok korrózió veszélynek leginkább kitett része a cementkő, amelynek szövetszerkezete kedvezőtlen külső, környezeti vagy belső, anyagtani hatások következtében károsodhat. A mészkő-alapú ún. portlandcement kötőanyagú betonok tartósságát **elsősorban a környezeti hatások** veszélyeztetik, a bauxit-alapú aluminátcement kötőanyagú – a hazai „Citadur" bauxitcement gyártását 1949-ben és felhasználását 1950 körül megszüntették – bauxitbetonokat pedig döntő mértékben a cementkő szilárdságvesztő átalakulása teszi tönkre.

A portlandcementek és az aluminátcementek korróziós tulajdonságai eltérőek, amelynek oka lényegében az

$$SM = \frac{c(SiO_2)}{c(Al_2O_3) + c(Fe_2O_3)}$$

szilikátmodulusuk különbözőségében rejlik. Az SM szilikátmodulus értéke portlandcementek esetén Riesz et al. (1989) szerint 1,8-2,8 közé, Splittgerber (2012) szerint 1,7-4,0 közé, az aluminátcementek esetén pedig 0,2-0,5 közé esik.

Cikksorozatunkban a mészkőalapú ún. portlandcementek felhasználásával készült betonok oldódásos korróziójával foglalkozunk, amiből kifolyólag „cement" és „portlandcement" alatt mindig az MSZ EN 197-1:2011, MSZ 4737-1:2013 és MSZ 4737-2:2013 szabvány szerinti portlandcementeket értjük, beleértve a CEM III fajtájú kohósalak-, CEM IV fajtájú puccolán- és CEM V fajtájú kompozitcementeket is, amelyek megnevezésében a „portland" jelző nem szerepel; ezen túlmenően a „beton" kifejezést is az ilyen cementekkel készített betonokra alkalmazzuk.

A korrózió – mint az anyag felületéről kiinduló, kémiai (vagy elektrokémiai) reakció által okozott káros, tehát nem szándékosan előidézett elváltozás – fogalmát régebben csak fémek „szétrágódásának" (latin → corrodere = szétrágni) kifejezésére használták, ma azonban már szinte minden anyag kémiai károsodását, súlyosabb esetben tönkremenetelét korróziónak nevezik (Neumüller et al., 1982), akkor is, ha nem az anyag felületéről indul ki. Az építményeket, illetve szűkebb értelemben az építőanyagokat, az építőanyagok, így a beton szövetszerkezetét kedvezőtlen *külső környezeti* vagy *belső anyagtani* hatások bonthatják meg.

Az építmények, beleértve az építőanyagok, a betonok *külső,* környezeti hatásra bekövetkező károsodásait fizikai, kémiai vagy biológiai (biogén) okokra lehet visszavezetni, amelyek közül a kémiai és a biológiai hatások folyamatát és következményét korróziónak tekintjük és nevezzük; az állandó vagy változó fizikai hatásokat – mint például a hidrotechnikai hatás, a hő-, a fagy-, a koptatóhatás – pedig önálló károsító jelenségként vagy a korróziós folyamatokat befolyásoló kísérő jelenségként, olykor a korróziós anyagok – értve alatta a korróziót okozó korrodáló és a korróziót szenvedő korrodálódó anyagot – állapotának előidézőjeként kezeljük. Ilyen értelemben a korróziót meg kell különböztetni a hidrotechnikai állapotváltozás hatásától, a hőmérsékletváltozás, a fagyás, a kopás, az erózió, kavitáció stb. okozta tisztán mechanikai roncsolódástól (Neumüller et al., 1982).

Az építőanyagok korróziójának *belső* anyagtani forrásait az anyag összetevőinek, szennyeződéseinek a víztartalom, a hőmérséklet stb. függvényét képező tulajdonságaiban, állapotváltozásában, illetve az ilyen állapotú összetevők határfelületi összeférhetetlenségében kell keresni.

Korrózió csak víz jelenlétében lép fel; függetlenül annak megjelenési formájától, ami lehet például felszíni folyó- vagy állóvíz, eső, harmat, köd, légnedvesség (páratartalom), talajvíz, talajnedvesség, felszínre jutó víz, anyagba felszívódó víz (falnedvesség), kondenzvíz stb., de akár az építőanyag természetes nedvességtartalma is.

A vizek – mint a korrózióban szerepet játszó ionok oldószerének – korróziót befolyásoló legfontosabb tulajdonságai, anyagjellemzői a kémhatás, a keménység és az agresszív széndioxid-tartalom, amely sajátságokkal cikksorozatunk 1. részében foglalkoztunk.

Az építőanyagok, ezen belül a beton fizikai (azaz kémiai átalakulással nem járó), **kémiai és biológiai (azaz mikroorganizmusok életfunkciói hatására keletkező vegyületek okozta)** korrózióját két nagy csoportba szokás sorolni aszerint, hogy a korrózió a beton duzzadásával vagy oldódásával jár. Ezek

a fogalmak az Építéstudományi Intézetben kidolgozott és miniszteri utasítás mellékleteként 1952-ben kiadott, műszaki előírás szintű „Betonok és habarcsok" (Építésügyi Minisztérium Műszaki Főosztálya) kiadványban is szerepeltek: „A savak a betonban oldási folyamatot indítanak, de a kénsav esetében duzzadási jelenség is felléphet."

Nem sokkal később Biczók Imre (1956, 1960) már a részleteket is tárgyalva szólt arról, hogy a *duzzadásos* és az *oldódásos* korrózió folyamatában, külső megjelenési formájában, és a beton szövetszerkezetének megváltozásában, e szövetszerkezeti változás betonszilárdságra gyakorolt hatásában is különbözik egymástól.

Az 1980-as évek második felében lépett érvényre az azóta visszavont, a beton- és vasbetonszerkezetekre nézve korrozív anyagokat és erősségüket rendszerező MI 17215-2:1986 műszaki irányelv és a ma is érvényes, a beton- és vasbetonszerkezetek korrózióvédelmi fogalom-meghatározásait tárgyaló MSZ 17213-1:1989 szabvány. Ez utóbbiban megkülönböztetik az instabil cementkő átkristályosodása, a cementkő és az adalékanyag vagy az adalékszer káros egymásra hatása kiváltotta, a külső környezeti hatásoktól független belső korróziót és a környezetben lévő agresszív anyagok, az elektromos áram (az acélbetétek elektrokémiai korrózióját okozó kóboráram) vagy a biológiai hatások következtében fellépő külső betonkorróziót.

Az MSZ 17213-1:1989 szabvány készítői a beton káros elváltozását okozó korrozív anyagot

- gyengén agresszívnak minősítették, ha a szerkezet betonjának korrózióvédelme primer módon elvégezhető;
- közepesen agresszívnak minősítették, ha a szerkezet betonjának korrózióvédelme az agresszív hatásnak ellenálló védőanyaggal biztosítható;
- erősen agresszívnak minősítették, ha a szerkezet betonjának korrózióvédelmére csak az agresszív hatásnak ellenálló védőanyagok némelyike alkalmas.

Megjegyzés: A szabványban a beton- és vasbetonszerkezetek betonját teljesen tönkre tevő, védőanyagokkal el nem hárítható betonkárosodást okozó nagyon erősen agresszív korrozív anyagokról nem szólnak.

Az MSZ 17213-1:1989 szabvány szerint:

- „A" típusú betonkorrózió a cementkő alkotóelemeinek oldódása vagy átalakulása lágy víz vagy semlegesen hidralizáló (vizes oldatban hidroxil-csoportot befogadó) sóoldatok hatására. E típusba tartozik a kilúgozási korrózió és a cserebomlási korrózió;
- „B" típusú betonkorrózió a savak, lúgok, savanyúan, vagy bázikusan hidralizáló sók okozta korrózió;
- „C" típusú betonkorrózió a beton alkotóelemeinek térfogatnövekedése, illetve a cementkő szerkezetének roncsolódása az agresszív anyagok okozta kémiai reakciók vagy az agresszív anyagok betonbeli kristályosodása következtében. Ilyen korrózió például a szulfátkorrózió;
- „D" típusú betonkorrózió olyan károsodás, amelyet agresszív szerves vegyületek okoznak.

Az MI 17215-2:1986 műszaki irányelvnek és MSZ 17213-1:1989 szabványnak előzménye is volt, az MI 17215-2:1986 műszaki irányelvet például az MSZ-04-88-1:1975 szabvány helyett adták ki, így érthető, hogy azok tartalmát Palotás László és Balázs György már 1980-ban ismertette. E korrózióvédelmi szabályozásról Balázs György és Tóth Ernő könyvében (1997) is olvasni lehet, a MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 10. fejezetében pedig részletekbe menően megtalálható.

Mindezek alapján *duzzadásos* korróziónak tekintjük a beton károsodását, amelynek folyamán vagy a korrodáló oldat kémiai hatására vagy a betonalkotók összeférhetetlenségének, a szennyezők állapotváltozásának eredményeképpen az összetevők eredeti térfogatához képest nagyobb térfogatú reakciótermékek keletkeznek, és ezért a beton szövetszerkezete szétmorzsolódik, szilárdságát veszti. A duzzadásos korrózió mind külső, mind belső hatásra megindulhat. A *külső hatásra* meginduló duzzadásos korróziót elsősorban a természetes talajokban és talajvizekben, valamint a felszíni vagy felszínre jutó természetes vizekben oldott szulfátok vagy kationok okozzák. A *belső hatásra* meginduló duzzadásos korrózió általában a cementkő és az adalékanyag között lejátszódó kémiai reakció, esetleg az adalékanyag vagy a keverővíz szennyeződései korrozív hatásának következménye. Végkimenetelét tekintve e csoportban tárgyalhatóak azok a – sók kationjai okozta – kémiai korróziós folyamatok is, amelyekben a betonok szövetszerkezeti átalakulása oldódásos korrózióként indul, végül duzzadásos korrózióként teljesedik ki (Stark et al., 2013).

Megjegyezzük, hogy az acélbetétek tartósságára veszélyt jelentő karbonátosodással és az acélbetéteknek a környezeti vizekből, jégolvasztó sózásból vagy a betonösszetevők szennyezettségéből eredő kloridionok okozta korróziójával e helyen részletesebben nem foglalkozunk.

Oldódásos korróziónak tekintjük a beton károsodását, ha a korrodáló oldat hatására a cementkő kalciumtartalmú fázisai, mint a szabad kalcium-hidroxid (portlandit, $Ca(OH)_2$) vagy a kalcium-szilikát-hidrát fázisok (C-S-H fázis, $3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O$) fizikailag feloldódnak, kilúgozódnak vagy jelentősebb kémiailag duzzadás nélkül átalakulnak. A beton oldódásos korróziója során a cementkő nehezen oldható fázisaiból könnyen oldódó reakciótermékek képződnek.

Az oldódásos korrózió a beton porozitásának növekedéséhez és – lényegében a szövetszerkezet szétmorzsolódása nélkül – szilárdságának csökkenéséhez, akár elvesztéséhez vezet.

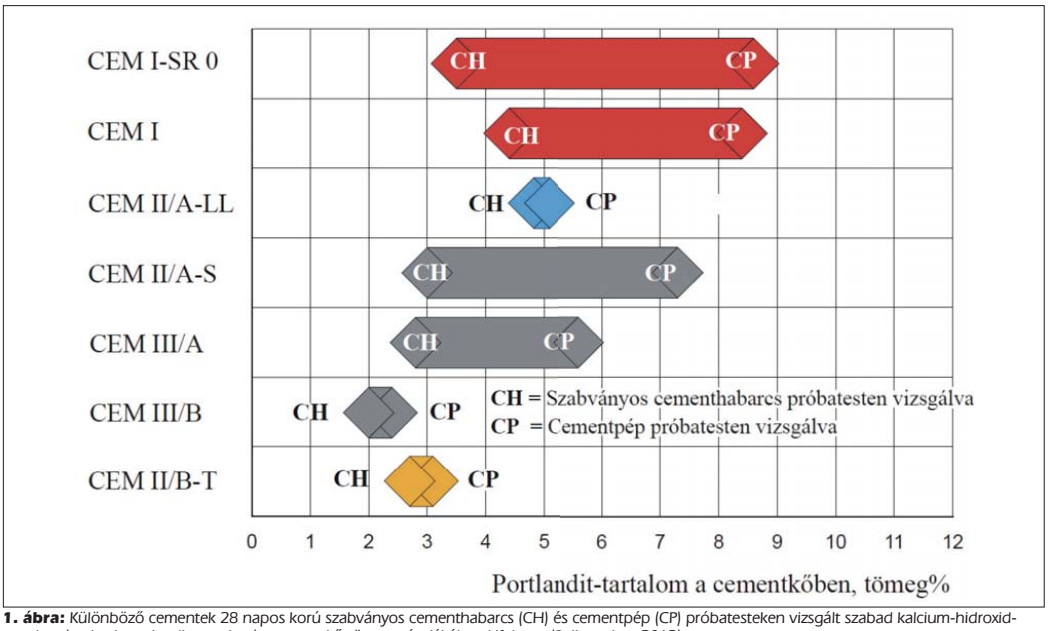
A beton oldódásos korróziójának jellemzője, hogy mindig külső hatásra, az anyag felületéről indul meg. Az oldódásos korrózió a cserebomlásra hajlamos sók, a savak, az egyes **állati zsírok, növényi zsírok és zsíros olajok** mészvegyületátalakító, illetve -kioldó képességének következménye, amellyel az agresszív vizek – közöttük a szennyvizek – egyéb agresszív folyadékok, agresszív gázok, gőzök, permetek és erjedő anyagok rendelkeznek (Benedix, 2008).

E cikkben a „tömör" (nem sejtesített) cementkővel, folyamatos – beleértve lépcsős – szemmegoszlású (nem egyszemcsés) adalékanyaggal készített, megszilárdult állapotban legalább 800 kg/m^3 átlagos testsűrűségű és 10 N/mm^2 átlagos nyomószilárdságú betonok szervetlen anyagok okozta oldódásos korróziójának főbb típusait tekintjük át.

2. A BETON LÁGY VÍZ ÉS KONDENZVÍZ OKOZTA KILÚGOZÓDÁSA

Lágy víznek általában a 0-7 nk° német keménységi fokú, 0-1,25 mmol/dm^3 alkáliföldfémion-tartalmú vizeket tekintjük (Balázs et al., 2017); kondenzvíznek pedig a gőzből a hidegebb felületre lecsapódott vizet nevezzük, amely keménységét tekintve szintén lágy víz.

A cementkőben lévő mintegy 5-10% – a cement eredeti tömegére vonatkoztatva 10-14% (Biczók, 1956, 1960) – szabad kalcium-hidroxid-tartalomból 1,0 dm^3 lágy víz mintegy 1,2 grammot képes kioldani. A kioldható mennyiség a cementkő szabad kalcium-hidroxid-tartalmának (*1. ábra*) és a cementkő pórustartalmának növekedésével növekszik, és fordítva. A cementkő szabad kalcium-hidroxid-tartalmának kioldása



1. ábra: Különböző cementek 28 napos korú szabványos cementhabarcs (CH) és cementpép (CP) próbatesteken vizsgált szabad kalcium-hidroxid-tartalma (szabad portlandit-tartalma) a cementkő tömegszázalékában kifejezve (Splittgerber, 2012)

után a lágy víz hatására a kalcium-szilikát-hidrát ásványok is felhasadnak. A cementkő kalcium-aluminát- és ferrit-fázisai a lágy vízben lényegében oldhatatlanok, ám ennek ellenére – már csak kis mennyiségük folytán is – számottevő szilárdsághordozó képességgel nem rendelkeznek. Mindezek következtében a lágy, sókat nem tartalmazó vizek bizonyos mértékben károsan hatnak a betonra; a sarkok és élek letöredeznek, a betontest kiüregelődik, összerepedezik, végül szétesik.

Ha a beton nem elég tömör, repedezett, akkor a kapillárisokba hatoló lágy víz súlyos károkat okozhat, mint ez régebben a völgyzáró gátaknál előfordult (Krenkler, 1980; Benedix, 2008).

A vasbeton hűtőtornyok nemcsak méreteik, hanem technológiai szerepük folytán is jelentős korróziós veszélynek vannak kitéve. Magasságuk meghaladhatja, alsó átmérőjük megközelítheti a 100 mt. A természetes szellőzésű nedves üzemű hűtőtornyokban a mintegy 40 °C hőmérsékletre felmelegedett ipari hűtővizeket 24-30 °C hőmérsékletre hűtik. A kürtő levegőjének relatív nedvességtartalma közel 100%. A torony felső részén elsősorban a gőzből kondenzálódott lágy víz megtámadja a betont: a szabad kalcium-hidroxid-tartalmat oldja és kilúgozza, ezzel lágy víz korróziót okoz, a beton pH-értékét lecsökkenti, az acélbetétek korrózióját elősegíti. Ha a hűtővíznek szulfátion-tartalma is van, akkor az elragadott és lebegtetett vízcseppekből lecsapódott víz elsősorban a kürtőfal alján okoz szulfátkorróziót: a cementkő-alkotó kalcium-aluminát-hidrátok duzzadó kalcium-szulfoaluminát-hidráttá alakulnak (Kausay et al., 1986).

A talajjal érintkező, a talajban hosszú utat megtett, abból sókat kioldott forrásvizek, folyóvizek és a tavak vize jobbára kemény víz, amely a betonok szabad kalcium-hidroxid-tartalmát oldani kevéssé, illetve nem képes.

A beton kilúgozhatóságát az MSZ EN 12457-1:, -2:, -3: és -4:2003 szabványsorozat szerint, adott folyadékszilárdanyag arány mellett, különböző szemnagyságú mintákon lehet meghatározni. Ezek az eljárások – annak ellenére, hogy a por- vagy szemcsemintából kioldható teljes anyagmennyiség meghatározására alkalmasak – jellegüknél fogva nem alkalmasak a beépített betonból adott idő alatt kilúgozódó anyag mennyiségének pontos meghatározására (Benedix, 2008).

3. SAVAK ÉS SÓIK OKOZTA OLDÓDÁSOS KÉMIAI BETONKORRÓZIÓ

3.1. Általános áttekintés

A szervetlen és szerves savak agresszivitásuktól függően általában azokat a betonépítményeket támadják meg, amelyek savas gőzöket vagy gázokat hordozó levegővel, vagy savakat tartalmazó vizekkel érintkeznek.

A savak agresszivitása nemcsak a koncentrációtól, hanem az erősségüktől is függ. A savak erősségét az határozza meg, hogy az oldószerben (vízben) széthasadásuk (elektrolitos disszociáció) során mennyi protont adnak át a vízmolekuláknak. Ha egy sav vizes oldatában a disszociáció kb. 20-100%, akkor a sav erős; ha a disszociáció kb. 1-20%, akkor a sav mérsékelten erős; ha pedig a disszociáció kb. 0,1-1,0%, akkor a sav gyenge (Neumüller et al., 1984)

A savak erősségét az oldat koncentrációjának (c) függvényében a K_S disszociációs egyensúlyi savállandó (savdisszociáció állandó, savegyensúlyi állandó) fejezi ki (Benedix, 2008):

$$K_S = \frac{c[H_3O^+] \cdot c[A^-]}{c[HA]}$$

ahol:

$c[H_3O^+]$ = hidroxóniumion-koncentráció, mol/dm^3
$c[A^-]$ = savmaradék-koncentráció (az A^- anion koncentrációja), mol/dm^3
$c[HA]$ = sav-koncentráció (az A^- anion tartalmú sav koncentrációja), mol/dm^3.

1. táblázat: Néhány összetartozó sav és savmaradék p*K*S sav-, illetve p*K*B bázisexponensének értéke (https://www.chemie.de/lexikon/Säurekonstante.html)

Erősség	Nagyon erős sav			Erős sav			
Sav pK_S	-10	-6	-3	-1,74	-1,32	2,13	3,14
	$HClO_4$	HCl	H_2SO_4	H_3O^+	HNO_3	H_3PO_4	HF
Savmaradék	ClO_4^-	Cl^-		H_2O	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	F^-
Erősség pK_B	24	20	17	15,74	15,32	11,87	10,68
	Nagyon gyengén bázikus			Gyengén bázikus			

Erősség	Közepesen erős sav			Gyenge sav		Nagyon gyenge sav	
Sav pK_S	4,75	6,52	6,92	9,40	15,74	23	34
	CH_3COOH	H_2CO_3	H_2S	HCN	H_2O	NH_3	CH_4
Savmaradék	CH_3COO^-	HCO_3^-	HS^-	CN^-	OH^-	NH_2^-	CH_3^-
Erősség pK_B	9,25	7,48	7,08	4,60	-1,74	-9	-20
	Közepesen bázikus			Erősen bázikus		Nagyon erősen bázikus	

A K_S savállandó egyenlő 10-nek a –pK_S-edik hatványával ($K_s = 10^{-pKs}$), és fordítva, a pK_S savexponens (saválladó-hatványkitevő) egyenlő a K_S savállandó tizes alapú logaritmusának negatív értékével (pK_S = – $\log_{10}$ K_S). Elektrolitos disszociáció esetén a pK_S-érték általában annál nagyobb, minél gyengébb az elektrolit. Ha egy gyenge sav oldatában a nem disszociálódó rész koncentrációja megegyezik a savion koncentrációjával, akkor a pK_S-érték azonos a pH-értékkel (Neumüller et al., 1983).

Ehhez hasonlóan a bázisok erősségét kifejező K_B disszociációs egyensúlyi bázisállandó alakja az oldat koncentrációjának (*c*) függvényében a következő:

$$K_B = \frac{c[OH^-] \cdot c[BH^+]}{c[B]}$$

ahol:

c[OH^-] = hidroxidion-koncentráció, mol/dm^3
c[BH^+] = a protolizált (a hidroxidionokat leadott) bázis koncentrációja (a BH^+ kation, azaz a bázisgyök koncentrációja), mol/dm^3
c[B] = bázis-koncentráció (a BH^+ kation tartalmú bázis koncentrációja), mol/dm^3.

Megjegyzés: Az irodalomban előfordul, hogy a szögletes zárójelek helyett gömbölyű zárójeleket, a BH^+ helyett HB^+ jelölést alkalmaznak.

Néhány összetartozó sav és savmaradék pK_S sav-, illetve pK_B bázisexponensének értékét a Brønsted-féle sav-bázis elmélet

$$Sav + H_2O \leftrightharpoons H_3O^+ + Bázis$$

összefüggése és a

$$pK_S + pK_B = 14$$

törvényszerűség alapján (Neumüller et al., 1984) az *1. táblázatban* tüntettük fel.

3.2. A beton szervetlen savak és sóik okozta korróziója

A szervetlen savak (ásványi savak) közül oldódásos betonkorróziót leggyakrabban a sósav (HCl), a salétromsav (HNO_3), a kénsav (H_2SO_4), a foszforsav (H_3PO_4), a szénsav (H_2CO_3) és a bórsav (H_3BO_3) okoz. A szervetlen savak oldják a cementkő összetevőit, és hatásukra a cementkő kalcium-hidroxid ($Ca(OH)_2$) tartalma könnyen oldható kalciumsóvá alakul, a savmaradéknak megfelelően például kalcium-klorid ($CaCl_2$), kalcium-nitrát ($Ca(NO_3)_2$), kalcium-szulfát ($CaSO_4$) stb. keletkezik. Emellett különböző alumínium- és vassók, valamint nagyon gyenge savhatású kovasavgél (metakovasav H_2SiO_3) is képződik (Biczók, 1956, 1960).

A vízáramlás sebességének növekedése a savas korrózió hatását fokozza. A vízáramlás fokozatainak a (0,1-10,0) m/nap, (10,0 m/nap – 0,01 m/s), (0,01-0,2) m/s, (0,2-2,0) m/s és > 2,0 m/s határértékeket tekintették. A víz áramlási sebessége kötött (agyag és iszap) talajban kisebb, a nagyobb hézagtérfogatú szemcsés talajban nagyobb (Biczók, 1956, 1960).

Az ipari szennyvizek a különböző töménységű nehézfémek mellett gyakran szervetlen savakat (például sósavat (HCl), kénsavat (H_2SO_4), salétromsavat (HNO_3)) és szerves savakat (például ecetsavat (CH_3COOH), tejsavat ($CH_3CH(OH)COOH$), gyümölcssavat) tartalmaznak. A nehézfémek és szervetlen savak kibocsátója a fémfeldolgozó-ipar, a szerves savaké az élelmiszeripar, valamint a szesz- és élesztőipar (Benedix, 2008).

A visszavont MI 17215-2:1986 műszaki irányelv szerint a savtartalmú korrozív víz, folyadék

- gyengén agresszív, ha a Ba_1-Ba_2 alcsoportban 5,0 < pH ≤ 6,5, a Ba_3 alcsoportban 4,5 < pH ≤ 6,0;
- közepesen agresszív, ha a Ba_1-Ba_2 alcsoportban a savtartalom nem oxidáló sav esetén ≤ 8 tömeg%, és oxidáló sav esetén ≤ 5 tömeg%; a Ba_3 alcsoportban pedig a savtartalom ≤ 15 tömeg%;
- erősen agresszív, ha a Ba_1-Ba_2 alcsoportban a savtartalom nem oxidáló sav esetén > 8 tömeg%, és oxidáló sav esetén > 5 tömeg%; a Ba_3 alcsoportban pedig a savtartalom > 15 tömeg%;

ahol a képződő kalcium-vegyületek oldhatósága vízben a Ba_1 alcsoportban > 1,000 g/100 ml, a Ba_2 alcsoportban 0,002-1,000 g/100 ml, a Ba_3 alcsoportban < 0,002 g/100 ml.

A sók betonra gyakorolt hatását általában mindig a sók savmaradéka (a savnak a hidrogén atom nélküli része) alapján kell megítélni. A sók hatása lényegében ugyanaz, mint a savak hatása, csak sokkal gyengébb (Biczók, 1956, 1960).

Néhány szervetlen sav és különböző lúgokkal alkotott sója betonkorróziós hatásának jellege a *2. táblázatban* látható. A savak betonkorróziós hatásának jellege nem feltétlenül esik egybe az *1. táblázatban* szereplő pK_S savexponensek erősségének mértékével.

A sók vizes oldatának pH-értéke a sók kationjai, illetve an-

2. táblázat: *Néhány szervetlen sav és különböző lúgokkal alkotott sója betonkorróziós hatásának jellege (Krenkler, 1980)*

Savak \ Bázisok	NaOH Nátrium-hidroxid (Nátronlúg)	KOH Kálium-hidroxid (Kálilúg)	$Mg(OH)_2$ Magnézium-hidroxid	$Ca(OH)_2$ Kalcium-hidroxid	$Al(OH)_3$ Alumínium-hidroxid	$NH_4(OH)$ Ammónium-hidroxid	$Fe(OH)_2$ Ferrohidroxid $Fe(OH)_3$ Ferrihidroxid	Sók megnevezése a savmaradék alapján
① HCl, Hidrogén-klorid gáz, vizes oldata: Sósav	NaCl	KCl	① $MgCl_2$	$CaCl_2$	③ $AlCl_3$	① NH_4Cl	③ $FeCl_3$	Kloridok
① HNO_3, Salétromsav	$NaNO_3$	KNO_3	$Mg(NO_3)_2$	$Ca(NO_3)_2$	$Al(NO_3)_3$	② NH_4NO_3	$Fe(NO_3)_3$	Nitrátok
② H_2SO_4, Kénsav	② Na_2SO_4	② K_2SO_4	① $MgSO_4$	② $CaSO_4$	② $Al_2(SO_4)_3$	① $(NH_4)_2SO_4$	① $Fe_2(SO_4)_3$	Szulfátok
③ H_2S, Hidrogén-szulfid gáz (Kén-hidrogén gáz), vizes oldata: Kénhidrogénvíz	③ Na_2S	③ K_2S	③ MgS	③ CaS	③ Al_2S_3	–	③ FeS	Szulfidok
④ H_3PO_4, Foszforsav	Na_3PO_4	K_3PO_4	$Mg_3(PO_4)_2$	③ $CaHPO_4$ $Ca(H_2PO_4)_2$ $Ca_3(PO_4)_2$	$AlPO_4$	$(NH_4)_3PO_4$	$FePO_4$ $Fe_3(PO_4)_4$	Foszfátok
③ H_2CO_3, Szénsav	Na_2CO_3	K_2CO_3	$MgCO_3$	$CaCO_3$	–	$(NH_4)_2CO_3$	$FeCO_3$	Karbonátok
③ HF, Hidrogén-fluorid gáz, vizes oldata: Folysav	NaF	KF	MgF_2	CaF_2	AlF_3	NH_4F	FeF_2 FeF_3	Fluoridok

Megjegyzés:
- A betonra ① nagyon erősen korrozív ② erősen korrozív ③ közepesen korrozív ④ gyengén korrozív
- A kovasav (H_2SiO_3) és sói (szilikátok), valamint a hidrogén-oxo-aluminát ($H_2Al_2O_4$) és sói (aluminátok) a betonra nem korrozívak.
- A portlandcement vagy kohósalakcement kötőanyagú, kellő tömörségű betonok a kiskoncentrációjú lúgoldatoknak (például legfeljebb 20% nátrium-hidroxid tartalmú oldatoknak) általában ellenállnak (Biczók, 1960).
- A sókat ipari alkalmazásra általában nem sav-bázis reakció létrehozásával gyártják (Náray-Szabó, 1958; Neumüller et al., 1981-1984).

ionjai protolízisének – proton (hidrogénion) átadás-átvétellel járó kémiai reakciónak – lehetőségétől függ. Három lehetőség van (Benedix, 2008):

A. A *sóoldat semleges* lesz, ha a sónak nem képes sem a kationja, sem az anionja a vízzel reakcióba lépni, és protont (hidrogéniont) leadni vagy felvenni. Semleges sóoldat például a nátrium-klorid (NaCl), a kálium-nitrát (KNO_3), a magnézium-szulfát ($MgSO_4$) vizes oldata.

- A periódusos rendszer 1. csoportjának (oszlopának, a régi jelölés szerinti I. főcsoportjának) fémkationjait – például a nátriumiont és a káliumiont – és 2. csoportjának (II. főcsoportjának) fémkationjait – például a magnéziumiont és a kalciumiont – semleges kationoknak tekintjük, mert protolízisre nem képesek.
- Az erős savak anionjai, mint például a kloridion (Cl^-), a nitrátion ($NO3^-$), a monohidrogén-szulfátion (HSO_4^-) nagyon gyengén savas kémhatású ionok.
- Ha a só protolízisre képes kationból és protolízisre képes anionból áll, akkor a só pH-értéke a sóképző sav pK_S sav-exponens és a sóképző bázis pK_B bázis-exponens értékének viszonyától függ. Ha az exponens-értékek egyforma nagyságúak, akkor a só ebben a viszonylag ritka esetben is semleges kémhatású (pH = 7), mint például az ammónium-acetát ($NH_4 \cdot CH_3 \cdot COO$).

Magyarázat:

- ha $c[H_3O^+] > c[OH^-]$, akkor az oldat savas kémhatású,
- ha $c[H_3O^+] = c[OH^-]$, akkor az oldat semleges kémhatású,
- ha $c[H_3O^+] < c[OH^-]$, akkor az oldat lúgos kémhatású.

Ha egy oldatban a $c[H_3O^+]$ koncentráció nagy érték, akkor a $c[OH^-]$ koncentráció kis érték kell legyen és fordítva, ugyanis teljesülnie kell a $K_S \times K_B = K_{Viz}$, illetve a $pK_S + pK_B = 14$ követelménynek.

B. A *gyenge savakból* képződött sók anionjainak vizes oldata *bázikus* kémhatású.

- Az ilyen bázikus anionok – például , CO_3^{2-} (karbonátion), PO_4^{3-} (foszfátion), CN^- (cianidion) és $CH_3 \cdot COO^-$ (acetátion) – a vízből a lúgképződéshez hidroxidiont (OH^- protont) vonzanak magukhoz. Például a nátriumacetát só ($Na \cdot CH_3 \cdot COO$) vizes oldatában az acetátionból ($CH_3 \cdot COO^-$) gyenge ecetsav ($CH_3 \cdot COOH$) képződik, miközben hidroxidionok maradnak vissza, amelyek hatására az oldat pH-értéke megnövekszik:

$$CH_3 \cdot COO^- + H_2O \rightleftharpoons CH_3 \cdot COOH + OH^-$$

- A többértékű savakból – például foszforsavból (H_3PO_4) – származó bázikus anionok – például a hidrogénfoszfátion (HPO_4^{2-}) – proton-felvétellel szintén lúgos oldatot adnak:

$$HPO_4^{2-} + H_2O \rightleftharpoons H_2PO_4^- + OH^-$$

- A mészkő ($CaCO_3$) bomlása savas oldatok – például sósavoldat ($HCl + H_2O$) – hatására is egy olyan reakció, amely bázikus anionok (CO_3^{2-}) és a sav között játszódik le. A karbonátion (CO_3^{2-}) a sav két protonját erős bázisként köti magához. Ezáltal szénsav (H_2CO_3) keletkezik, amely széndioxidra (CO_2) és vízre (H_2O) esik szét.:

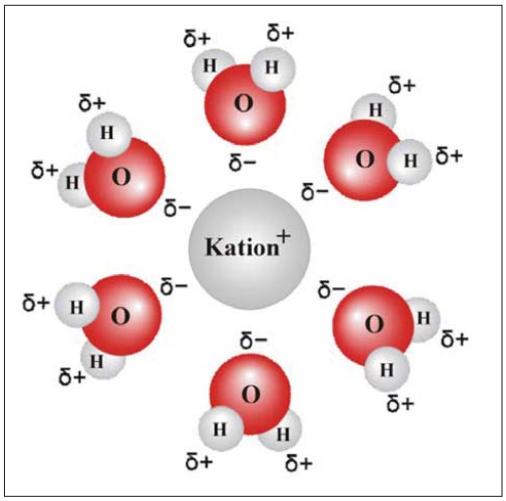
$$CaCO_3 + 2H_3O^+ + 2Cl^- \rightarrow CO_2 + Ca^{2+} + 2Cl^- + 3H_2O$$

C. A *gyenge bázisokból* származó sók vizes oldata *savas* kémhatású.

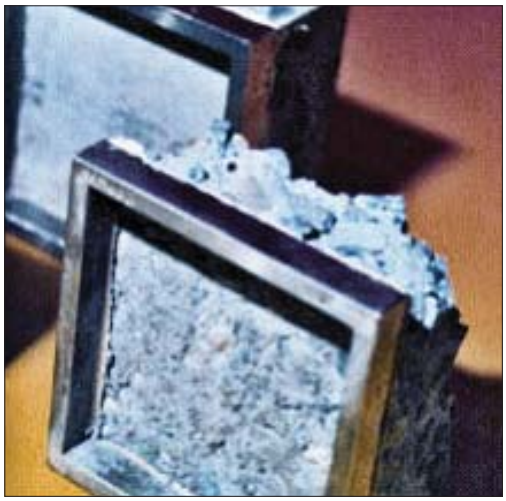
- Így például az ammóniából (NH_3) – amely gyenge bázis, és amelynek vizes oldata, a szalmiákszesz lúgos – származó sók, mint például az ammónium-klorid (NH_4Cl), vizes oldata savas kémhatású. Az ammónium-klorid savas kémhatású kationja (NH_4^+) hidroxónium-ion ($H3O^+$) képződését eredményezve átad a víznek egy protont:

$$NH_4^+ + H_2O \rightleftharpoons NH_3 + H_3O^+$$

- Különleges eset, hogy a háromszoros pozitív töltésű fémionok – mint az Al^{3+} és az Fe^{3+} ionok – sójának vizes oldata



2. ábra: Dipólusú vízmolekulákból álló hidrát-burok a kation körül (https://en.wikipedia.org/wiki/Solvation_shell)



3. ábra: Sósavoldat hatása a bazalt zúzottkő adalékanyagos betonra (Kausay et al. 1986)

szintén savas kémhatású. Ennek az a magyarázata, hogy e fémionok háromszoros pozitív töltése olyan erősen polarizálja a hidrát-burok (*2. ábra*) oxigén-hidrogén kötéseit, hogy az a kationból proton-lehasadáshoz, hidroxónium-ion képződéshez és ezzel az oldat savas reakciójához vezet. Példa erre az $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ alumínium-hexaakva-komplex ion átalakulása $[Al(H_2O)_5OH]^{2+}$ alumínium-pentaakva-hidroxidionná:

$$[Al(H_2O)_6]^{3+} + H_2O \rightleftharpoons [Al(H_2O)_5OH]^{2+} + H_3O$$

A visszavont MI 17215-2:1986 műszaki irányelv szerint a lúgok és a bázikus sókat tartalmazó, a Bc agresszivitási csoportba tartozó korrozív víz, folyadék

- gyengén agresszív, ha a pH-értéke > 9,0 és ≤ 10,5;
- közepesen agresszív, ha a lúg- vagy sótartalma ≤ 0 tömeg%; és
- erősen agresszív, ha a lúg- vagy sótartalma > 10 tömeg%.

4. A BETONNAK A SÓSAV ÉS A SÓSAV SÓI (KLORIDOK) OKOZTA KORRÓZIÓJA

4.1. Sósavkorrózió

A sósav (HCl) szúrós szagú, éghetetlen, mérgező gáz, amely vízben könnyen oldódik; például 1 dm³ víz **0 °C hőmérsékleten** 442 dm³, 20 °C hőmérsékleten 507 dm³ sósavat old fel. A kereskedelemben kapható tömény, 1,19 g/cm³ anyagsűrűségű sósavoldat 20 °C hőmérsékleten 38% sósavat tartalmaz, amely mintegy 12 mol/dm³ anyagmennyiségnek felel meg. A laboratóriumi hígított sósavoldat koncentrációja általában 2 mol/dm³.

Vízben a sósav csaknem 100%-ban savas jellegű hidroxóniumionokra (H_3O^+) és bázikus jellegű kloridionokra (Cl^-) bomlik (disszociálódik):

$$HCl + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + Cl^-$$

azaz minden HCl-molekula átadja protonját (H^+-ion) a víznek (H_2O), és ezért a keletkező hidroxóniumionok anyagmennyiség-koncentrációja egyenlő lesz a vízben oldott – időközben abban már nem lévő – sósav anyagmennyiség-koncentrációjával: $c(H_3O^+) = c(HCl)$.

Magyarázat: Az anyagmennyiség-koncentráció egy térfogat-egységnyi (dm³) oldatban lévő, moláris tömegű oldott anyag mólokban kifejezett kémiai anyagmennyisége. Mértékegysége: mol/dm³.

Sósav hatására a cement szabad kalcium-hidroxidja (portlandit, $Ca(OH)_2$) vízben nagyon gyorsan oldódó kalcium-kloriddá ($CaCl_2$, más néven klórkalcium) alakul, amely kimosódik, illetve kikristályosodik, ezért már a híg sósavoldat is ártalmas a betonra (*3. ábra*) (Biczók, 1956, 1960; Krenkler, 1980; Benedix, 2008).

4.2. Kloridkorrózió

A sósav sói közül a kalcium-kloridon kívül az ammónium-klorid (NH_4Cl), alumínium-klorid ($AlCl_3$), magnézium-klorid ($MgCl_2$) káros a szilárd betonra (Biczók, 1956, 1960).

A sósav sói a kloridok, amelyek az acélbetéteket kivétel nélkül károsítják. A vízben oldódó kloridok meggyorsítják a betonban lévő acélbetétek korrózióját.

A kloridok a betonra nézve különböző mértékben károsak: a magnézium-, ammónium- és alumínium-klorid kivételével a beton épségét általában nem veszélyeztetik. Kloridok kémiai hatására a beton nem duzzad, hanem csak lágyul, de végül szét is eshet (Biczók, 1956, 1960).

- A kalcium-klorid ($CaCl_2$, nevezik klórkalciumnak is) a portlandcement kötőanyagú betonra nem veszélyes, ha a friss betonhoz keverik, gyorsítja a kötést és a szilárdulást. Kalcium-kloridot az aluminátcementekhez nem szabad adagolni. Érdekes, hogy például a cementtartalomra számított 2-3% sósav – amely a szilárd betont jelentékenyen megrongálná – a friss beton keverővizéhez adva a hidratáció után néhány százalék kalcium-kloridot képez, **amely nagy valószínűséggel** megkötődik az aluminátokban, és így a jelentéktelen mennyiségű cementveszteségtől – és tegyük hozzá, hogy vasbeton esetén a karbonátosodás során esetleg szabaddá váló kloridionok acélbetétekre gyakorolt korrozív hatástól – eltekintve, kötésgyorsító hatásánál fogva még hasznos is. A beton keveréséhez használt, fertőtlenítés céljából klórozott „csapvíz" sem ártalmas a betonra

- A magnézium-klorid ($MgCl_2$) jól oldódó só, amely a betonnal érintkezve kationcsere folytán a betonból könnyen kilúgozódó kalcium-kloriddá ($CaCl_2$) alakul. A visszamaradó magnézium-hidroxid ($Mg(OH)_2$) vízben gyakorlatilag oldhatatlan amorf anyag, amely a beton felületén és pórusaiban tömör védőhártyát képezhet. Kísérletek szerint a portlandcement mintegy 2% magnézium-klorid (~5000 mg/dm^3 Mg^{2+} iontartalom) hatására kezd korrodálni. Az amorf magnézium-hidroxid a kristályos kalcium-hidroxid szilárdsághordozó szerepét átvállalni nem tudja, és kedvezőtlen körülmények között a beton duzzadásos tönkremenetelét okozhatja.
- A beton keverővize káros, ha 3,0 tömeg%-nál (30000 mg/dm^3 NaCl) több nátrium-kloridot tartalmaz.
- Az ammónium-klorid (NH_4Cl) megtámadja a betont, amelyre nézve már a gyenge oldatok is korrozívak.
- Az alumínium-klorid ($AlCl_3$) a betonra veszélyes.

Az útpályák téli csúszásmentesítéséhez használt olvasztósók a beton felületén általában csészealakú lepattogzást okoznak.

Az MSZ 4798:2016 szabvány szerint a friss betonnak a cement-tartalom, illetve kötőanyag-tartalom tömegszázalékában kifejezett megengedett legnagyobb kloridion-tartalma (Cl^-):
- betonszerkezet betonja esetén 1,0 tömeg% (10000 mg/dm^3 NaCl);
- vasbetonszerkezet betonja esetén 0,2 tömeg%, ha CEM III típusú cementtel készül, akkor 0,4 tömeg%;
- feszített vasbetonszerkezet betonja esetén 0,1 tömeg%, ha CEM III típusú cementtel készül, akkor 0,2 tömeg%.

Az MSZ 4798:2016/2M:2018 szabvány F melléklete szerint akkor kell a vasbeton- és a feszített vasbetonszerkezet betonját az acélbetétek védelmében XD2 környezeti osztályba sorolni, ha a betonnal érintkező talajvíz, egyéb természetes víz, szennyvíz vagy egyéb folyadék kloridion-tartalma (Cl^-) több mint 500 mg/dm^3.

Balázs György, Kovács Károly, Csizmadia Zoltánné és Kopecskó Katalin a BME Építőanyagok Tanszéken az 1990-2010 években végeztek kutatásokat a témában (Balázs et al., 1997; Csizmadia et al., 1993, 2001; Kopecskó et al., 2005). A kutatási eredmények azt bizonyítják, hogy a megszilárdult, 28 napos korú betonba a kapilláris pórusokon 10 nap alatt – öt ciklusos, 24 órás sóoldatban és 24 órás 100% relatív páratartalmú térben való tárolás alatt – behatoló 10%-os nátriumkloridoldatnak a kloridionjait a portlandcement trikalcium-aluminát (felit, C_3A) és tetrakalcium-aluminát-ferrit (celit, C_4AF) klinkerásványainak hidrátjai Friedel-só ($C_3A{\cdot}CaCl_2{\cdot}H_{10}$) vagy Friedel-só vasanalógjának és Kuzel-só formájában megkötik, mert a kísérleti beton még nem karbonátosodott. A gőzöléssel szilárdított mintákban több Friedel-sót találtak, mint a laboratóriumban 22±2 °C hőmérsékleten szilárdultakban. A kloridionok megkötésével párhuzamosan másodlagos ettringit képződését figyelték meg. **Megállapították, hogy az őrölt granulált kohósalakot** tartalmazó cementpépek kloridion-megkötő képessége nagyobb, mint a tiszta portlandcementpépeké. (Balázs, 2004, 2010; Kopecskó et al., 2017).

A visszavont MI 17215-2:1986 műszaki irányelv szerint a magnéziumion (Mg^{2+}) tartalmú korrozív víz, folyadék
- gyengén agresszív, ha cserebomlás esetén az agresszív kationok mennyisége az Ab_1 alcsoportban > 500 és ≤ 3000 mg/liter, az Ab_2 alcsoportban > 1000 és ≤ 5000 mg/liter, az Ab_3 alcsoportban > 10000 mg/liter; és
- közepesen agresszív, ha az Ab_1 alcsoportban > 3000 mg/liter és az Ab_2 alcsoportban > 5000 mg/liter.

Az MSZ 4798:2016/2M:2018 betonszabvány szerint, ha a beton- vagy vasbetonszerkezet olyan oldódásos betonkorróziót okozó agresszív folyadékok környezetében van, amelyek magnéziumion (Mg^{2+}) tartalma ≥ 100 és ≤ 1000 mg/liter közé esik, akkor a betont az XA4(H) környezeti osztályba; ha > 1000 és ≤ 2500 mg/liter közé esik, akkor az XA5(H) környezeti osztályba; ha pedig 2500 mg/liternél több, akkor az XA6(H) környezeti osztályba kell sorolni.

5. A BETONNAK A SALÉTROMSAV ÉS A SALÉTROMSAV SÓI (NITRÁTOK) OKOZTA KORRÓZIÓJA

5.1. Salétromsav-korrózió

A salétromsav (HNO_3) vízben savas jellegű hidroxóniumionokra (H_3O^+) és bázikus jellegű nitrátionokra (NO_3^-) bomlik (disszociálódik):

$$HNO_3 + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + NO_3^-,$$

és ezzel a kénsavnál korrozívabb hatású oldószer áll elő. A salétromsav erős oxidáló hatásának hátterében áll, hogy a nitrogén – amely a levegő összetételének 78%-át képezi – oxidációs száma. mind a salétromsavban, mind a nitrátokban +V, ami az elemek periódusos-rendszere 15. csoportjában (nitrogén, foszfor, arzén, antimon, bizmut) a lehető legnagyobb. *Magyarázat:* Az oxidációs szám a csak ionokból álló képzeletbeli molekulában lévő atom elektromos töltésének általános értéke, azaz egy elem oxidációfokát jellemző előjeles egész szám. Az elemi állapotú anyagok oxidációs száma nulla; az oxidálószereké (elektronok leadására képes anyagok) annál nagyobb pozitív előjelű szám, minél könnyebben leadják az oxigénjüket, más anyagokat oxidálnak, ők maguk pedig redukálódnak; a redukálószereké (elektronok felvételére képes anyagok) annál nagyobb negatív előjelű szám, minél inkább felveszik az oxigént, más anyagokat redukálnak, ők maguk pedig oxidálódnak.

Minthogy a salétromsav vízben gyakorlatilag teljes mértékben disszociálódik, – a sósav-disszociálódáshoz hasonlóan – a c(X) [mol/dm^3] anyagmennyiségkoncentrációra fel lehet írni, hogy $c(H_3O^+) = c(HNO_3)$ azaz a hidroxóniumionok anyagmennyiség-koncentrációja megfelel a vízben oldott salétromsav anyagmennyiség-koncentrációjának.

5.2. Nitrátkorrózió

A protolízis (proton leadás-felvétel) **következtében a salétrom**sav ammónium-sóinak vizes oldatai is savként viselkednek.

A salétromsav ammónium-sói vizes oldatainak egyike az ammóniumnitrát-oldat ($NH_4NO_3 + H_2O$), amelynek hatása a betonra az egyik legkedvezőtlenebb.

A salétromsav-, illetve nitrát-tartalmú vizek a tégla-, habarcs- és betonfelületeken salétromos, például káliumnitrát (KNO_3), nátrium-nitrát ($NaNO_3$) vagy kalcium-nitrát ($Ca(NO_3)_2$) kivirágzást okoznak.

A korrozív hatású nitrátok hordozói a talajvizek és a felszíni vizek, forrásai többnyire salétrom bányák és tárolók, műtrágya üzemek, trágyalétárolók stb. (Biczók, 1956, 1960; Benedix, 2008).

A salétromsav sóinak ionizált állapotában létrejövő ammóniumionok (NH_4^+) a cementkő szabad kalcium-hidroxidjával (portlandit, $Ca(OH)_2$) a betont korrodáló könnyen oldódó kalcium-vegyületeket és ammóniát (NH_3) képeznek, ez utóbbi szúrós szagú, mérgező gáz.

Az ammónia vízben igen jól oldódik, 20 °C hőmérsékleten 1 dm^3 víz 702 dm^3 ammóniát képes feloldani, ami 35%-os

ammóniaoldatnak (ammónium-hidroxid, NH_4OH) felel meg. Az ammónia-oldat gyengén lúgos kémhatású, mert a vízben oldott gáz hatására kis mennyiségben protolizált – 20 °C hőmérsékleten 0,1 mol/dm^3 vizes ammóniaoldatban kevesebb, mint 1% NH_3-molekula vesz részt a hidrogénion leadás-felvételben – ammónium- és hidroxidion képződik:

$$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$$

Az ammónia (NH_3) savakkal sókat, például salétromsavval (HNO_3) ammónium-nitrátot (NH_4NO_3) képez:

$$NH_3 + HNO_3 \rightarrow NH_4NO_3.$$

Megjegyzés: Ipari méretekben az ammóniát különböző előzmények után az 1910-1914 években kifejlesztett német Haber-Bosch eljárással a levegő nitrogénjéből és hidrogénjéből állítják elő 450-550 °C hőmérsékleten, 150-250 bar nyomáson:

$$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$$

Benedix (2008) szerint a szennyvizek nitrát-tartalmának csak mintegy egyharmada ered a háztartásokból, a nagyobb rész forrása a mezőgazdaság (állattartás, ásványi trágya, szerves trágya).

Az ammónia az ammónium-nitrát előállításon kívül a karbamid, ammónium-szulfát és ammónium-foszfát alapú műtrágyagyártás, továbbá a robbanóanyag-gyártás és a nitrogéntartalmú vegyi anyagok előállításának alapanyaga.

Balázs György és Csányi Erika a BME Építőanyagok Tanszéken 1900 és 2000 között kutatták a légszennyeződések vasbetonra gyakorolt hatását (Csányi et al., 1997). A kísérleti betonok CEM II/A-S 32,5 kohósalak-portlandcementtel készültek, MSZ 4719:1982 szabvány szerinti nyomószilárdsági osztályuk C12 és C20 volt. A próbatesteket 4 hónapon át tárolták 50-150 ppm (part per million, az egész egymilliomod része) koncentrációjú nitrogén-dioxid (NO_2) gáztérben. A vizsgálat végén a próbatestek felső 5 mm vastag rétegében a C12 jelű beton esetén 2,5 tömeg%, a C20 jelű beton esetén 1,5 tömeg% nitránion-tartalmat mértek. A laboratóriumi próbatesteken kívül megépült szerkezetek betonját is vizsgálták, és azt tapasztalták, hogy a műtrágyagyárak területén a nitrogén-dioxid beépülése a beton 50-60 mm vastag kérgébe 56%, és a beton pH-értéke szélsőséges esetben 8-9-re csökkent. A kutatók véleménye szerint, ha a beton nyomószilárdsági osztálya legalább C20 (MSZ 4719:1982) és a betonfedés legalább 20 mm, akkor kis légnedvesség-tartalom esetén a levegő nitrogén-dioxid-tartalma nem okoz acélbetét-korróziót (Balázs, 2004, 2010).

A visszavont MI 17215-2:1986 műszaki irányelv szerint az ammóniumion (NH_4^+) tartalmú korrozív folyadék, víz

- gyengén agresszív, ha cserebomlás esetén az agresszív kationok mennyisége az Ab_1 alcsoportban > 100 és ≤ 500 mg/liter, az Ab_2 alcsoportban > 200 és ≤ 1000 mg/liter, az Ab_3 alcsoportban > 2000 mg/liter; és
- közepesen agresszív, ha az Ab_1 alcsoportban > 500 mg/liter és az Ab_2 alcsoportban > 1000 mg/liter.

Az MSZ 4798:2016/2M:2018 betonszabvány szerint, ha a beton- vagy vasbetonszerkezet olyan oldódásos betonkorróziót okozó vizekkel, folyadékokkal vagy szennyvizekkel érintkezik, amelyek ammóniumion (NH_4^+) tartalma ≥ 15 és ≤ 30 mg/liter közé esik, akkor a betont az XA4(H) környezeti osztályba; ha a vizek, folyadékok ammóniumion-tartalma > 30 és ≤ 60 mg/liter közé, vagy szennyvizek esetén > 30 és ≤ 100 mg/liter közé esik, akkor az XA5(H) környezeti osztályba; ha pedig 60 mg/liternél több, vagy szennyvizek esetén 100 mg/liternél több, akkor az XA6(H) környezeti osztályba kell sorolni.

6. A BETONNAK A KÉNSAV ÉS SÓI (SZULFÁTOK), VALAMINT KÉN-HIDROGÉN ÉS SÓI (SZULFIDOK) OKOZTA KORRÓZIÓJA

Amíg kénsavtartalmú vizek és szennyvizek, gázok, gőzök, permetek a beton – a reakciótermékek duzzadásával kísért – *oldódásos* kénsavkorrózió*ját* okozhatják, addig a sótartalmú talajok, talajvizek, felszíni vizek oldott szulfátionjai (SH_4^{2-}) *duzzadásos* szulfátkorrózióra vezethetnek.

Említésre méltó, hogy 1990-2000 között a BME Építőanyagok Tanszéken a légszennyeződések vasbetonra gyakorolt hatása – fenn már említett – kutatásának alapkísérleti eredményeiből Balázs György és Csányi Erika megállapította, hogy a 200-500 ppm koncentrációjú kén-dioxid (SO_2) légtérbeli kezelés hatására a beton 10 mm vastag kérgében pernyetartalmú cementek esetén háromszoros, CEM I portlandcementek esetén ötszörös, kohósalak-tartalmú cementek esetén mintegy hétszeres volt a szulfátion-betelepülés a cementbe bekevert gipszkő szulfátion-tartalmához képest. Kénsavgyár területén lévő vasbetonszerkezet külső 10 mm vastag kérgében két-háromszoros gipsztartalmat észleltek a beton eredeti gipsztartalmához képest, ami csökkentette a betonkéreg légátbocsátó-képességét és nem csökkentette annak pH-értékét. A vizsgálati eredményekből arra következtettek, hogy ha a beton nyomószilárdsági osztálya legalább C20 (MSZ 4719:1982) és a betonfedés legalább 20 mm, akkor kis légnedvesség-tartalom esetén a levegő kén-dioxid-tartalma nem okoz acélbetét korróziót (Balázs, 2004, 2010).

Az MSZ 4798:2016/2M:2018 betonszabvány szerint, ha a beton- vagy vasbetonszerkezet olyan oldódásos betonkorróziót okozó agresszív folyadékok környezetében van, amelyek szulfátion () tartalma ≥ 200 és ≤ 600 mg/liter közé esik, akkor a betont az XA4(H) környezeti osztályba; ha a folyadékok szulfátion-tartalma > 600 és ≤ 1500 mg/liter közé esik, akkor az XA5(H) környezeti osztályba; ha pedig 1500 mg/liternél több, akkor az XA6(H) környezeti osztályba kell sorolni.

A kénsav és a kénsav sói (szulfátok), valamint a kén-hidrogén és a kén-hidrogén sói (szulfidok) okozta kémiai és biológiai betonkorrózióra vonatkozó ismereteket részletesen cikksorozatunk 3. részében tekintjük át.

7. FOSZFORSAV ÉS SÓI OKOZTA BETONKORRÓZIÓ

A foszforsav (H_3PO_4) kis mértékben oldja a betont, mert anionjai (PO_4^{3-}) a kalciummal oldhatatlan, nem kristályosodó, térfogatban nem növekvő trikalcium-foszfát ($Ca_3(PO_4)_2$) só védőréteg**et képeznek, amely a beton felületét a további kor**róziótól megvédi.

A foszforsav másik sója, a kalcium-dihidrogén-foszfát (szuperfoszfát, savanyú foszforsavas mész, $Ca(H_2PO_4)_2$) kevés foszforsavat is tartalmaz, és emiatt közepes mértékben agresszív a betonra (Biczók, 1956).

A foszforsav betonkorróziót okozó **sói főképp emberi ürü**lékből, kisebb részben mosó- és tisztítószerekből származnak. A mosó- és tisztítószerek agresszivitását elsősorban a bene lévő lúgok (például nátrium-hidroxid, NaOH), illetve savak (például kénsav, H_2SO_4 vagy ecetsav, CH_3COOH) okozzák (Benedix, 2008).

8. A VÍZ SZABAD SZÉNDIOXID-TARTALMA OKOZTA BETON-KORRÓZIÓ (SZÉNSAVKORRÓ-ZIÓ)

A **víz szabad széndioxid-tartalma okozta oldódásos beton-**korrózió folyamatát cikksorozatunk – e folyóirat 2017. évi 3. számában megjelent – 1. részének 5. fejezetében részletesen elemeztük. A vízben lévő széndioxid jelentős mértékben oldódhat a betonra agresszív szénsav alakjában. A szénsavtartalmú víz mintegy 165 g/dm^3 kalcium-karbonátot képes feloldani, ami 13 ezerszerese a tiszta víz kalcium-klorid feloldóképességének.

Szén-dioxid tartalma a víznek lehet, a levegőnek pedig van. A levegőben – bár csak mintegy 0,03%-ban – jelenlévő széndioxid-tartalom a cementkő mintegy 5-15%-ára tehető szabad kalcium-hidroxid-tartalmát (portlandit, $Ca(OH)_2$) kalcium-karbonáttá ($CaCO_3$) alakítja, ez a karbonátosodás.

A karbonátosodás kedvező hatását Kleinlogel et al. (1950) azzal magyarázta, hogy a szén-dioxid (CO_2) a betonban lévő könnyen kioldódó szabad kalcium-hidroxidot (portlandit, $Ca(OH)_2$) nehezen kioldódó kalcium-karbonáttá ($CaCO_3$) alakítja, szemben az esetleges szénsavkorrózióval, ami a víz szabad kalcium-hidroxid-tartalma könnyen kioldható kalcium-hidrokarbonáttá (kalcium-bikarbonát, $Ca(HCO_3)_2$) változásának a következménye.

Már nem sokkal később megállapították (például Biczók, 1956, 1960), hogy a víz szabad széndioxid-tartalma (CO_2) a betonra nézve kémiailag akkor agresszív, ha mennyisége meghaladja az oldott hidrokarbonátok ($Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$) koncentrációjának megfelelő egyensúlyi szénsav-mennyiséget. A szénsav ($H_2CO_3 = CO_2 + H_2O$) gyengesége ellenére a víz agresszív szabad széndioxid-tartalma (CO_2) a cementkő kationjait (például: Ca^{2+}, Mg^{2+}) oldatba viszi, és azokkal a rosszul oldódó karbonátokból ($CaCO_3$, $MgCO_3$) könnyen oldódó és kilúgozódó hidrokarbonátokat ($Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$) hoz létre (*oldódásos korrózió*). Ez öntápláló, ismétlődő, összetett kémiai folyamat**, mert a cementkő szabad kalcium-hidroxid-**jával a keletkezett hidrokarbonátok is reakcióba lépnek, és ennek következtében a karbonátok kicsapódnak (kazánkő), majd azokból újra hidrokarbonátok képződnek, a felszabaduló lágy víz pedig a cementkő szabad kalcium-hidroxidját kioldja (*5. ábra*). A szénsavas víz a cementkő kalcium-szilikát-hidrát fázisait és aluminát-, valamint ferrit-kötéseit is megtámadja (Krenkler, 1980). Mindezek folytán a beton nagymértékben kilúgozódik, és a cementkő, illetve a beton szilárdsága jelentősen csökken.

A visszavont MI 17215-2:1986 műszaki irányelv szerint a Bb agresszivitási csoportba tartozó szabad szén-dioxid (CO_2) tartalmú korrozív víz, folyadék

- gyengén agresszív, ha szabad szén-dioxid mennyisége > 5 és ≤ 70 mg/liter, és
- közepesen agresszív, ha > 70 mg/liter.

Az MSZ 4798:2016/2M:2018 betonszabvány szerint, ha a beton- vagy vasbetonszerkezet olyan oldódásos betonkorróziót okozó folyadékok környezetében van, amelyek agresszív szén-dioxid (CO_2) tartalma ≥ 15 és ≤ 40 mg/liter közé esik, akkor a betont az XA4(H) környezeti osztályba; ha a vizek, folyadékok agresszív szén-dioxid-tartalma > 40 és ≤ 100 mg/liter közé esik, akkor az XA5(H) környezeti osztályba; ha pedig 100 mg/liternél több, akkor az XA6(H) környezeti osztályba kell sorolni.



5. ábra: Savas esővíz hatására a vasbetonlemezből kioldódott, cseppkőszerű karbonátok (Fénykép: Kausay)

9. A BETON HIDROGÉN-FLUORID, FOLYSAV ÉS SÓI OKOZTA KORRÓZIÓJA

A hidrogén-fluorid (HF) színtelen, szúrós szagú, mérgező gáz. A többi hidrogén-halogeniddel ellentétben a hidrogén-fluorid nem képez ionokat, mert a hidrogén és a fluorid atomos kötéssel kapcsolódik egymáshoz (Neumüller et al., 1982).

Magyarázat: A kémiai kötéseknek három – tisztán ritkán előforduló, de valamelyikük meghatározó jellegű – típusát különböztetik meg: az atomos. az ionos és a fémes kötés.

Az *atomos kötést* (más néven: apoláris kötést, kovalens kötést) az atomok legkülső elektronhéjának közös elektronpárjai alakítják ki. Az atomos kötésű molekulák nem ionokból állnak, és így nem vezetik az áramot sem alacsony, sem magas hőmérsékleten. Szigorúan véve az apoláris vegyületek azonos atomfajtákból épülnek fel (például a H_2, Cl_2, O_2 stb.), tágabb értelemben pedig apoláris vegyületek azok is, amelyeknek a molekuláiban a dipólusmomentumok egymást nagymértében kiegyenlítik. Ilyen molekula a legtöbb szerves vegyület (például CH_4 stb.). Az apoláris kötésű molekulákban a vegyértékelektronok összege többnyire páros szám, például a H_2-ben 2, a H_2O-ban $2\times1 + 1\times6 = 8$, a széndioxidban (CO_2) $1\times4 + 2\times6 = 16$ vegyértékelektron van. Ezeknek a molekuláknak a legkülső elektronhéjban lévő elektronjai elektron-párok alkotására törekszenek, hogy magányos elektron az elektronhéjon lehetőleg ne maradjon (Neumüller et al., 1981, 1982).

A nemfémek hidridjei (kovalens hibridek) – a hidrogén két elemből vagy összetevőből álló (biner) vegyületei – voltaképpen atomos kötésű molekulák alkotta nagyon különböző tulajdonságú gázok. Például:

- a metánhidrát-oldat (a CH_4 metán gázból nagy nyomás alatt képződő, mintegy ⅔ rész metánt és ⅓ rész széndioxidot tartalmazó szilárd metán-hidrát vizes oldata) semleges,
- az ammóniaoldat (az NH_3 ammónia gáz vizes oldata) gyengén bázikus,

- a kénhidrogénvíz (a H_2S kén-hidrogén gáz vizes oldata) nagyon gyengén savas,
- a sósav (a HCl hidrogén-klorid gáz vizes oldata) és a folysav (a HF hidrogén-fluorid gáz vizes oldata) erősen savas kémhatású (Klenkler, 1980).

Az atomos kötésű molekulákkal ellentétben az *ionos kötésű* (más néven: poláris kötésű, elektrosztatikus kötésű) molekulák oldott vagy olvadt állapotban kémiai bomlás közben vezetik az elektromosságot, és vízben ionképződéssel többnyire oldhatóak. Ilyen kötés van például a nátrium-kloridban, a kalcium-oxidban, a folypátban stb., azaz a szilárd, nehezen párolgó, ion-rácsokat alkotó kristályos vegyületekben. Ezekben a szervetlen, sószerű szilárd molekulákban szilárd, kristályos állapotban is ionok vannak. Az ionos kötésben ható erőknek nincs egyértelmű irányuk, hanem minden irányban egyforma mértékben hatnak. A kristályok oldásakor az oldószer molekulái az ionok közé nyomulnak, és ez annál könnyebb, minél kisebb a kristályrácsban az ionokat összetartó erő. Ez az oldhatóság jelensége (Neumüller et al., 1982).

A *fémes kötést* az jellemzi, hogy a fém kristályrácsában minden fématomot nagyszámú azonos atom veszi körül, és azokat nem elektronpárok tartják össze, hanem a külső elektronhéjon lévő, leadott elektronok felhője fogja közre (Neumüller et al., 1982).

A hidrogén-fluorid vízzel folysavvá (fluor-hidrogénsav) elegyíthető. Az ún. folysav a hidrogén-fluorid 40%-os vizes oldata. A folysav a villamos áramot nem vezeti, a legtöbb fémet feloldja, a szilikátokat, köztük a kvarcot (SiO_2) is megtámadja, miközben szilícium-tetrafluorid gáz (SiF_4) képződik (Krenkler, 1980; Neumüller et al., 1982):

$$SiO_2 + 4 \cdot HF \rightarrow SiF_4 + 2 \cdot H_2O.$$

A szilícium-tetrafluorid a kalcium-hidroxiddal (portlandit, $Ca(OH)_2$) kalcium-fluoridot (CaF_2) képez:

$$SiF_4 + 2 \cdot Ca(OH)_2 \rightarrow 2 \cdot CaF_2 + SiO_2 \cdot 2 \cdot H_2O.$$

Ezt a reakciót fel lehet használni a beton savállóságának fokozására. Az *okratálásnak* nevezett eljárás során a betonelemeket zárt térben, régebben vákuumban, újabban nyomás alatt szilícium-tetrafluorid **gázzal kezelve a cementkő savállóságát** veszélyeztető szabad kalcium-hidroxid-tartalma vízben oldhatatlan kalcium-fluoriddá (CaF_2) alakul, és a cementkő pórustartalmát csökkentő, tömörségét, vízzáróságát, szilárdságát növelő kovasav-hidrát ($SiO_2 \cdot 2 \cdot H_2O$) képződik (Krenkler, 1980; Neumüller et al., 1983; MSZ 17213-1:1989).

Az eljárásról német folyóiratokban Wittekindt (1952, 1954) adott hírt. Az „Ocrat"-eljárásról idehaza 1956-ban Náray-Szabó István akadémikus Szervetlen kémia **című könyvének I. kö**tetében lehetett olvasni. Náray-Szabó István az okratálással és az okrátbeton kutatásával az 1950-es évek első felében, munkatársaival (Kovács József, Nagy András) az Építéstudományi Intézetben foglalkozott. Az 1964-ben kiadott, az Építéstudományi Intézetben, Buday Tibor vezetésével kidolgozott, a beton és vasbeton készítését tárgyaló műszaki előírás (ME-19-63) szerint „az okratálás során a fluortartalmú gázt túlnyomással vagy anélkül juttatják a betonba. Okratálással a beton vízzárósága, korrózióállósága, valamint szilárdsága fokozható. Az ilyen beton gyenge savak hatásának is ellenáll. Az eljárást előregyártott elemek és monolit tartályok kezelésére alkalmazzák. Az előregyártott elemek gázkezelésére vonatkozó részletes előírásokat az IME-16-60 ideiglenes műszaki előírás tartalmazza".

Az eljárást, amelynek során a betont nem szilícium-tetrafluorid gázzal, hanem hidrogén-sziliko-fluorid sóinak oldatával kezelik – *fluátozásnak* nevezik (MSZ 17213-1:1989).

10. A KOVASAV ÉS A KOVASAV SÓINAK SZEREPE A BETONBAN

A szilícium-dioxid (kvarc, SiO_2) – amely a növényi, állati és emberi szervezetekben kovasav (H_2SiO_3) formájában van jelen – a kovasav (H_2SiO_3) vízben nem oldódó anhidridje (anhidridnek az oxidos savak vízelvonás utáni részét nevezik). A kovasav-anhidrid vízoldhatatlansága folytán a $SiO_2 + H_2O \rightarrow H_2SiO_3$ reakció nem jöhet létre – tehát: $SiO_2 + H_2O \neq H_2SiO_3$ –, és ezért a kovasav betonkorróziót sem okoz (Krenkler, 1980). Igaz, hogy emiatt a kovasav építőanyagtani szerepe elméletinek mondható, de a kovasav sói, a szilikátok mégis igen jelentős építőanyag-összetevők, amelyek egyebek mellett a portlandcement-klinker mintegy háromnegyedét alkotják.

Az eljárást, amelynek során a beton korrózióállóságát nátrium- vagy káliumszilikát-oldatos (vízüveges, például: Na_2SiO_3) kezeléssel javítják az MSZ 17213-1:1989 szabványban szilikonozásnak, a vízüveg kötőanyag, ásványi adalékanyag és adalékszer keverékéből készített korrózióálló, „saválló" betont pedig vízüvegbetonnak, máshol lúgbetonnak nevezik. Ez utóbbi ilyenformán a mai geopolimer korábbi változatának tekinthető.

11. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A szervetlen savak és a sók, ritkábban a lúgok is nedvesség jelenlétében a beton káros kémiai, esetleg fizikai elváltozásait okozhatják. E korrozív savak és sók hordozói elsősorban a talajvizek, szennyvizek, ipari és mezőgazdasági folyadékok, olykor a szennyezett levegő vagy például a közlekedési utak téli jégolvasztó sózása. A savas kémhatású oldatok általában a beton oldódásos korrózióját okozzák, de a kénsav, illetve a szulfátok duzzadásos korrózió előidézői is lehetnek. A sók közül a gyenge bázisokból származó sók hatása káros, mert azok vizes oldata savas kémhatású. A lúgok közül főképp az ammónia vizes oldata okozhat betonkorróziót.

A beton kénvegyületek, valamint szerves anyagok okozta kémiai és biológiai korróziójának szakirodalmát következő cikkünkben tekintjük át.

12. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

13. ACKNOWLEDGEMENT

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

14. HIVATKOZÁSOK

Balázs Gy. – Tóth E. (1997), „Beton- és vasbeton szerkezetek diagnosztikája I. Általános diagnosztikai vizsgálatok", *Műegyetemi Kiadó,* Budapest

Balázs Gy. (2004), „Beton és vasbeton V. A kutatás története I.", *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Balázs Gy. (2010), „Különleges betonok és betontechnológiák III." *Akadémiai Kiadó,* Budapest

Balázs L. Gy. – Kausay T. – Kopecskó K. – Nemes R. – Nehme S. G. – Lublóy É. – Józsa Zs. – Arany P. (2017), „Betonok oldódásos korróziója. Szakirodalmi áttekintés. 1. rész: A vizek és folyadékok kémhatása, keménysége, agresszív széndioxid-tartalma", *Vasbetonépítés*, XIX. évf. 3. szám. pp. 46-59.

Benedix, R. (2008), „Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten", 4. Auflage, Studium. *Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH*, Wiesbaden

Biczók I. (1956), „Betonkorrózió, betonvédelem", *Műszaki Könyvkiadó*, Budapest

Biczók, I. (1960), „Betonkorrosion, Betonschutz", *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Csányi, E. and Balázs, Gy. (1997): Analysis of different cement based pastes in SO_2 and NO_2 atmospheres", *Periodica Polytechnica Ser. Civil Eng.*, Vol. 41 (2), pp. 169-182.

Csizmadia, J.; Kovács, K. and Balázs, Gy. (1993), „Thin-layer chromatography for demonstrating chloride ions and its kations in concrete samples", *Periodica Polytechnica Ser. Civil Eng.*, Vol. 37 (4), pp. 321-327.

Csizmadia, J.; Balázs, Gy. and Tamás, F.D. (2001), „Chloride ion binding capacity of aluminoferrites", Cement and Concrete Research 31(4):577-588, DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00458-6, https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00458-6

Kausay T. – Szekeresné K. M. (1986), „Betonok korrózióvédelme felületkezeléssel", *Szakipari Technika*, 3. szám. pp. 63-65.

Kleinlogel, A. – Walz, K. – Vierheller, H. (1950): „Einflüsse auf Beton und Stahlbeton", Fünfte Auflage, *Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin*

Kopecskó K. (2006), „A gőzölés hatása a cement klinkerek és cementek kloridion megkötő képességére", PhD értekezés, p.100.

Kopecskó, K. – Balázs, Gy. (2005), „Chloride ion binding of cement clinkers and cements influenced by steam curing", *fib* Symposium "Structural Concrete and Time", La Plata 2005, Vol. 1, pp. 147-154.

Kopecskó, K. – Balázs, Gy. L. (2017), „Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements", Advances in Materials Science and Engineering Volume 2017, Article ID 7940247, p. 13., https://doi.org/10.1155/2017/7940247

Krenkler, K. (1980), „Chemie des Bauwesens. Band 1. Anorganische Chemie", *Springer-Verlag*, Berlin/Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-81475-4

Náray-Szabó I. (1956), „Szervetlen kémia", I. kötet, *Akadémiai Kiadó,* Budapest

Náray-Szabó I. (1958), „Szervetlen kémia", III. kötet, *Akadémiai Kiadó,* Budapest

Neumüller, O-A. szerk. (1981), „Römpp vegyészeti lexikon", Első kötet, *Műszaki Könyvkiadó,* Budapest

Neumüller, O-A. szerk. (1982), „Römpp vegyészeti lexikon", Második kötet, *Műszaki Könyvkiadó,* Budapest

Neumüller, O-A. szerk. (1983), „Römpp vegyészeti lexikon", Harmadik kötet, *Műszaki Könyvkiadó,* Budapest

Neumüller, O-A. szerk. (1984), „Römpp vegyészeti lexikon", Negyedik kötet, *Műszaki Könyvkiadó,* Budapest

Palotás L. – Balázs Gy. (1980), „Mérnöki szerkezetek anyagtana 3. Beton – habarcs – kerámia – műanyag", *Akadémiai Kiadó,* Budapest

Riesz L. szerk. (1989), „Cement- és mészgyártási kézikönyv", *Építésügyi Tájékoztatási Központ,* Budapest

Splittgerber, F. (2012), „Identifizierung der Zementart in Zementsteinen und die Übertragbarkeit auf Mörtel und Betone", Dissertation, *Bauhaus-Universität Weimar*

Stark, J. – Wicht, B. (2013), „Dauerhaftigkeit von Beton", *Springer Vieweg Verlag*, Berlin/Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-35278-2

Wittekindt, W. (1952), „Der säurefeste Ocrat-Beton", *Zement-Kalk-Gips,* Jg. 5. pp. 203-205.

Wittekindt, W. (1954), „Der säurefeste Ocrat-Beton", *Betonstein-Zeitung,* Jg. 20. pp. 469-474.

15. HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK, ÉPÍTÉSÜGYI MINISZTERI UTASÍTÁS, MŰSZAKI ELŐÍRÁS ÉS IRÁNYELV

DIN 38414-4:1984 „Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente (Gruppe S). Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4)"

Építésügyi Minisztérium Műszaki Főosztálya: „Betonok és habarcsok". A 89. sz. miniszteri utasítás melléklete. Készült az Építéstudományi Intézetben. *É. M. Építőipari Könyv- és Lapkiadó,* Budapest, 1952.

MÉÁSZ ME-04.19:1995 „Beton és vasbeton készítése. 10. fejezet. Agresszív hatásnak ellenálló betonok", műszaki előírás

MI 17215-2:1986 „Beton- és vasbeton szerkezetek korrózióvédelme. Agresszív közegek osztályozása", visszavont műszaki irányelv

MSZ 4719:1982 „Betonok", visszavont szabvány

MSZ 4737-1:2013 „Különleges cementek. 1. rész: Mérsékelten szulfátálló cementek"

MSZ 4737-2:2013 „Különleges cementek. 2. rész: Fehércementek"

MSZ 4798:2016 „Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelőség, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon"

MSZ 4798:2016/2M:2018 „Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelőség, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon" Az MSZ 4798:2016 módosítása

MSZ 17213-1:1989 „Építőipari korrózióvédelem fogalommeghatározásai. Beton- és vasbeton szerkezetek"

MSZ EN 197-1:2011 „Cement. 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei"

MSZ EN 12457-1:2003 „Hulladékok jellemzése. Kioldódás. Megfelelőségi kioldási eljárás szemcsés hulladékokra és iszapokra. 1. rész: Nagy szilárdanyag-tartalmú és 4 mm-nél kisebb szemcseméretű anyagok egylépéses, szakaszos kioldása 2 l/kg folyadék - szilárd anyag arány alkalmazásával (szemcseméret-csökkentéssel vagy anélkül)"

MSZ EN 12457-2:2003 „Hulladékok jellemzése. Kioldódás. Megfelelőségi kioldási eljárás szemcsés hulladékokra és iszapokra. 2. rész: 4 mm-nél kisebb szemcseméretű anyagok egylépéses, szakaszos kioldása 10 l/kg folyadék - szilárd anyag arány alkalmazásával (szemcseméret-csökkentéssel vagy anélkül)"

MSZ EN 12457-3:2003 „Hulladékok jellemzése. Kioldódás. Megfelelőségi kioldási eljárás szemcsés hulladékokra és iszapokra. 3. rész: Nagy szilárdanyag-tartalmú és 4 mm-nél kisebb szemcseméretű anyagok kétlépéses, szakaszos kioldása 2 l/kg és 8 l/kg folyadék - szilárd anyag arány alkalmazásával (szemcseméret-csökkentéssel vagy anélkül)"

MSZ EN 12457-4:2003 „Hulladékok jellemzése. Kioldódás. Megfelelőségi kioldási eljárás szemcsés hulladékokra és iszapokra. 4. rész: 10 mm-nél kisebb szemcseméretű anyagok egylépéses, szakaszos kioldása 10 l/kg folyadék - szilárd anyag arány alkalmazásával (szemcseméret-csökkentéssel vagy anélkül)"

Dr. Balázs L. György (1958) okl. építőmérnök, mérnöki matematikai szakmérnök PhD, Dr. habil., egyetemi tanár, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék vezetője. MTA műszaki tud. kandidátusa. Fő kutatási területei: beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), roncsolásmentes vizsgálatok. Speciális betonok és betétek: szálerősítésű betonok (FRC), nem acélanyagú (FRP) betétek, megerősítések anyagai és módjai, HPC, UHPC, LWC. Tűzállóságra való tervezés, tűzállóság fokozása. Fagyállóság fokozása. Kémiai ellenállóképesség fokozása. Tartósság. Használati élettartam. Fenntartható építés. Erőátadódás betonban, vasbeton tartók repedezettségi állapota. Fáradás. Lökésszerű terhelés. Nukleáris létesítmények. A ***fib*** (Nemzetközi Betonszövetség) elnöke (2011-2012), jelenleg tiszteletbeli elnöke. A ***fib*** Magyar Tagozat elnöke. Az Int. PhD Symp. in Civil Engineering alapítója. A ***fib*** Com 9 „Dissemination of knowledge" elnöke.

Dr. Kausay Tibor (1934) okl. építőmérnök (1961), vasbetonépítési szakmérnök (1967), egyetemi doktor (1969), a műszaki tudomány kandidátusa (1978), Ph.D. (1997), címzetes egyetemi docens (1985), címzetes egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken (2003), a ***fib*** Magyar Tagozat tagja (2000), az MTA gróf Lónyay Menyhért emlékérmese (2003), a Palotás László-díj birtokosa (2015). Tevékenysége a betontechnológiai és a kő- és kavicsipari kutatásra, fejlesztésre, szakértésre, oktatásra, szabványosításra terjed ki. Publikációinak száma mintegy 220.

Dr. Kopecskó Katalin (1961) okl. vegyészmérnök (BME, Vegyészmérnöki Kar, 1990), okl. betontechnológus szakmérnök (2004), PhD (2006), az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék oktatója 1999 és 2014 között, egyetemi docens a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén. Fő érdeklődési területei: építőanyagok tartóssága, cementek és cement kiegészítő anyagok hidratációja, anyagvizsgálat röntgendiffrakcióval és termoanalitikával. A ***fib*** Magyar Tagozat, az SZTE, valamint az MSZT/MB 102 „Cement és mész" Nemzeti szabványosító műszaki bizottság tagja.

Dr. Nemes Rita (1978) okl. építőmérnök, betontechnológiai szakmérnök, PhD, egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési területei: roncsolásmentes betonvizsgálatok, hulladék alapú adalékanyagok és kiegészítő anyagok alkalmazása betonban, betonacél tapadás speciális betonokban, könnyűbetonok, tartósság. A ***fib*** Magyar Tagozatának és a Szilikátipari Tudományos Egyesületnek tagja.

Dr. Nehme Salem Georges (1963) okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a beton porozitása, a betonok és öntömörödő betonok tartósságának összefüggése a porozitással, az öntömörödő betonok és acélszálas öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében, az öntömörödő betonok tömegbetonként történő alkalmazási problémainak megszüntetése. A Magyar Mérnöki Kamara (T1-01-9159), a ***fib*** Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

Dr. Lublóy Éva (1976) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2001), okl. betontechnológus szakmérnök (2011), okl. tűzvédelmi szakmérnök (2011), egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén (2008). Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A ***fib*** Magyar Tagozat tagja.

Dr. Józsa Zsuzsanna (1950) PhD, címzetes egyetemi tanár a BME-n, építészmérnök, épületrekonstrukciós szakmérnök. Főbb kutatási területei: könnyűbeton, építőanyagok tönkremenetele és védelme, szerkezetek hő- és nedvességtechnikai jellemzői, környezetkímélő építés anyagai.

Dr. Arany Piroska (1946) okl. szerkezetépítő mérnök, címzetes egyetemi docens. A BME Építőanyagok, majd az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék oktatója 1970 és 2009 között. Oktatási tevékenységét a nappali, a levelező tagozaton, szakmérnöki és egyéb tanfolyamok keretében végzi jelenleg is. Kutatási, ipari megbízásos és szakértői tevékenységet elsősorban betontechnológia, kötőanyagok, szakipari munkák anyagai, minőség-ellenőrzés témakörben végez. Az MMK szakértője, tagja több szakmai bizottságnak, a ***fib*** Magyar Tagozatának, az SZTE-nek.

DISSOLUTION OF CONCRETE BY ACIDS – Literature review
Part 2: Chemical or physical corrosion of concretes by dissolution owing to aggressive inorganic agents

György L. Balázs – Tibor Kausay – Katalin Kopoecskó – Rita Nemes – Salem G. Nehme – Éva Lublóy – Zsuzsanna Józsa – Piroska Arany

Soft water and aggressive waters, liquids, gases, vapours, sprays, fermenting materials in contact with hardened concrete, concrete products, reinforced concrete and prestressed reinforced concrete components can cause dissolution corrosion of cementitious concrete. In Part 1 of our series (Balázs et al., 2017), published in issue 3 of Volume 2017 of this journal, the concepts of the pH of water and liquids, the hardness and carbon dioxide content of water, the acidity and aggressive carbon (carbonic acid) content, influenced by carbonate hardness (variable hardness) were analysed according to the literature. In Part 2 herein, we review the literature on dissolution corrosion caused by soft water or inorganic materials.

Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) alkalmazása építőmérnöki feladatokban
Application of scanning electron microscope in Civil Engineering

Dr. KOPECSKÓ Katalin[1] egyetemi docens –
Prof. BALÁZS L. György[2] egyetemi tanár

[1]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.
E-mail: kopecsko.katalin@epito.bme.hu Tel: (36-1) 463-2238, Fax: (36-1) 463-2017
http://gmt.bme.hu/
[2]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. http://em.bme.hu/

Abstract

Purpose of study of internal structure of materials – both with optical microscopy and scanning electron microscopy – is to find explanations for stress and deformation properties as well as cracking in the material based on internal properties, bond and interaction of components. Scanning electron microscopy provides observations for both in micro as well as in nano range. Examples of current studies included inside of: fibres in concrete, nonwoven felts, characteristics of cements and supplementary materials, application of air entrainment in concrete in order to improve freeze-thaw resistance or to increase of chemical resistivity of concrete.

Összefoglaló

Az anyagszerkezet megismerésének célja – optikai mikroszkóppal és pásztázó elektronmikroszkóppal egyaránt – hogy magyarázatot kapjunk az anyag térbeli szerkezetéből, az alkotók egymásra épüléséből, ill. együttdolgozásából származó folyamatokra, erőtani, alakváltozási és repedezettségi szempontból egyaránt. A pásztázó elektronmikroszkóp segítségével a mikro és nano méret tartományba nyúló érzékelésre van lehetőségünk. A cikkben betekintést adunk korábbi és jelenleg is folyó kutatásokban használatos anyagok, szálak, szálas anyagok, cement és cement kiegészítő anyagok morfológiájával kapcsolatosan, légbuborék képző adalékszer hatásával, valamint a beton kémiai ellenálló képességének vizsgálatával kapcsolatos megfigyelésekről.

Kulcsszavak: pásztázó elektronmikroszkópia, SEM, morfológia, mikroszerkezet, nanoszerkezet

1. BEVEZETÉS

A szabad szemmel nem látható objektumokat mikroszkópos módszerekkel tanulmányozhatjuk. Az optikai mikroszkóppal elérhető legnagyobb nagyítás sokszor nem elegendő, vagy éppen a felbontóképesség nem elégséges, ami újabb technikák és mikroszkópi eszközök fejlesztéséhez vezetett. A fénymikroszkóp segítségével azokat a tárgyakat lehet megkülönböztetni, amelyek nem kisebbek, mint a fény hullámhossza. A fény átlagos hullámhossza 0,55 mikrométer. Azok az objektumok, amelyek közelebb vannak egymáshoz, mint a fény hullámhosszának a fele (0,275 mikrométer), egynek láthatók. Az az objektum, amelynek az átmérője kisebb, mint 0,275 mikrométer, vagy elmosódottnak látjuk, vagy egyáltalán nem látható. Ahhoz, hogy mikroszkóp alatt további részleteket láthassunk, másfajta "megvilágítást" kell használnunk, a fénynél rövidebb hullámhosszal.

A pásztázó elektronmikroszkóp fejlesztése a múlt század harmincas éveiben kezdődött [1]. Az elektronmikroszkópban a katódból kilépő elektronokat vákuumban gyorsítják fel. A elektronsugár hullámhossza rendkívül kicsi, a fehér fény hullámhosszának százezred része. A gyors elektronokból képezett nyalábot fókuszálják, amely a tárgyon abszorbeálódik vagy szétszóródik, miáltal leképezi a tárgyat [2].

A pásztázó elektronmikroszkópiát széles körben alkalmazzák: anyagtudományi jellegű, biológiai vagy földtani eredetű minták morfológiájának megismerésére, elemzésére. A SEM fontos alkalmazási köre a mikrotechnika (pl. nyomtatott áramkörök) és a nanotechnológia (pl. szén nanocsövek) is. Az építőmérnöki tudományokban felhasználható mind anyagtudományi céllal, mind tartóssági-diagnosztikai céllal, valamint új anyagok esetében a hatás – mikroszerkezet összefüggésének tanulmányozásakor. A cikkben példákat mutatunk be érdekes építőmérnöki alkalmazásokról vagy anyagokról.

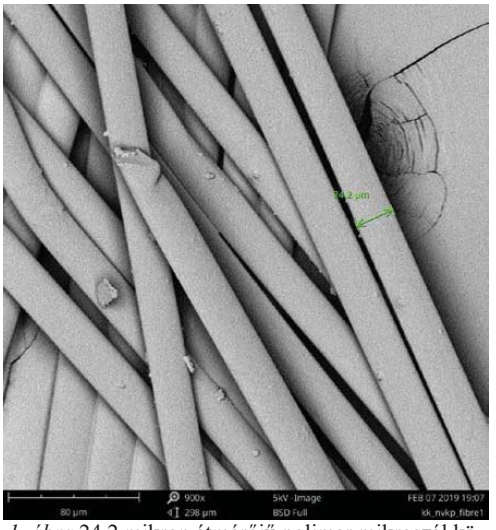
További lehetőségeket rejt magában a méréstechnika, hogy a legtöbb pásztázó elektronmikroszkóp elemanalizátorral (röntgensugaras energiadiszperzív spektroszkópia, EDS/EDX/EDAX) van egybeépítve, amivel a kiválasztott objektumról egy kiválasztott pontjáról, vonal mentén, vagy egy általunk meghatározott területen megkaphatjuk az elemi összetételt. A röntgensugaras energiadiszperzív spektroszkópia egy analitikai módszer, amelyet a minta elemi összetételének elemzésére vagy kémiai jellemzésére használnak. Ezen képessége nagyrészt annak az alapelvnek köszönhető, hogy minden elemnek egyedi atomszerkezete van, amely gerjesztő sugárzás hatására az elemre jellemző elektromágneses emissziós spektrumot bocsát ki. A röntgensugaras energiadiszperzív spektroszkópia a gerjesztő röntgensugárzás és a minta elemeinek kölcsönhatásán alapul [3].

Az építőmérnöki alkalmazásokban megtalálhatók mind elektromosan vezetőképes, mind elektromosan nem vezetőképes (szigetelő) jellegű anyagok. Ez utóbbi anyagokból készített minták esetében a megfelelő képalkotáshoz vagy alacsony vákuumú üzemmódot választunk, vagy vékony, vezetőképes réteget (arany, szén) gőzölünk a mintára a mintaelőkészítés során, amellyel megelőzhetjük a minta töltődését.

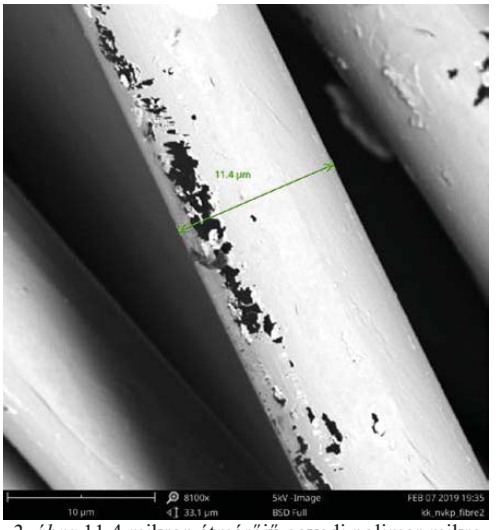
2. PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSZKÓPIA (SEM) ALKALMAZÁSA SZERKEZETI ANYAGOKBAN

2.1 Szerkezeti anyagok – Beton tűzállóságának fokozása mikroszálakkal

Mikroszálak alkalmazásával növelhető a betonok tűzállósága. Ez elsősorban annak köszönhető, hogy a polimer szálak kb. 160 °C-on megolvadnak, így a betonban a dehidratáció során keletkező gőz a kialakuló pórusokon keresztül el tud távozni. Ezzel megakadályozható a beton „spalling" jellegű tönkremenetele [4]. Pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk két, különböző átmérőjű mikroszálról (*1. és 2. ábra*). A módszerrel lehetőség nyílik a vizsgálandó objektumok egyes méreteinek meghatározására is, így az *1. ábrán* látható szál átmérője 24,2 mikron, míg a *2. ábrán* látható szál átmérője 11,4 mikron.



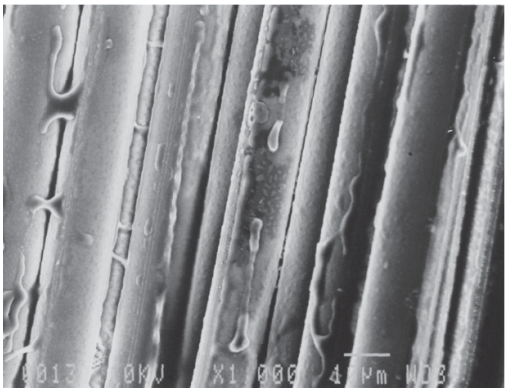
1. ábra 24,2 mikron átmérőjű polimer mikroszál köteg SEM felvétele,
nagyítás: 900x



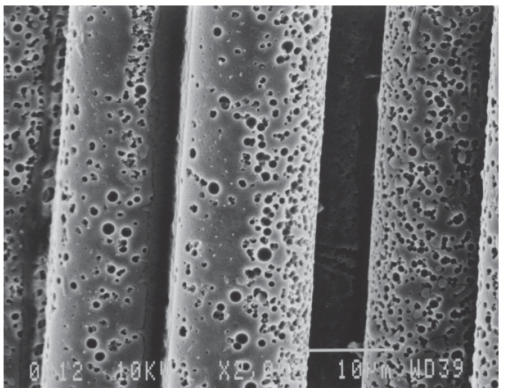
2. ábra 11,4 mikron átmérőjű egyedi polimer mikroszál SEM felvétele,
nagyítás: 8100x

2.2 Szerkezeti anyagok – Beton zsugorodási repedéseinek megelőzése szálakkal

A mikroszálak elsősorban polipropilénből vagy üvegből készülhetnek, és hatásosan alkalmazhatók a beton zsugorodási repedéseinek megelőzésében is. A lúgos kémhatású betonba alkáli álló (alkali resistant, AR) üvegből készült üvegszálakat lehet keverni: integrális AR-üvegszál kötegeket szálerősítésként, vagy diszperzibilis AR-üvegszálakat a repedések kialakulásának megelőzésére. Az üveg alkáli állóságát elsősorban a cirkónium-dioxid tartalom növelésével érik el. A *3. és 4. ábrán* integrális AR-üvegszálakat láthatunk eredeti állapotban, illetve gyorsított öregítési tesztet (56 napos, telített $Ca(OH)_2$ oldatban, 70 °C-on történő tárolást) követően. A *3. ábrán* jól látható, hogy az egyedi szálakat ragasztó anyag tartja össze szálköteggé, míg a *4. ábrán* az üvegszálak gyorsított öregítési teszt hatására kialakuló felületi károsodását láthatjuk. Ez részben a felületi műgyanta bevonat, részben az üveg károsodása, amely azonban a szálak tapadásának növekedését hozza létre a cementkőben [5].



3. ábra Integrális AR-üvegszál köteg, eredeti állapotban, nagyítás: 1000x [6]



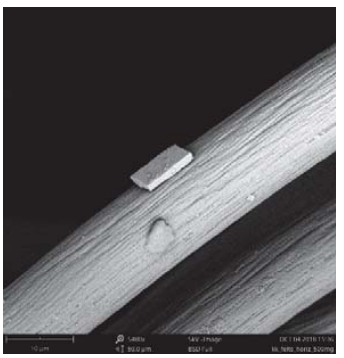
4. ábra AR-üvegszálak, 56 napos, telített $Ca(OH)_2$ oldatban (70 °C) történő kezelést követően, nagyítás: 2000x [6]

2.3 Szerkezeti anyagok – Szerkezetek tűzvédelme szénszálas filcekkel

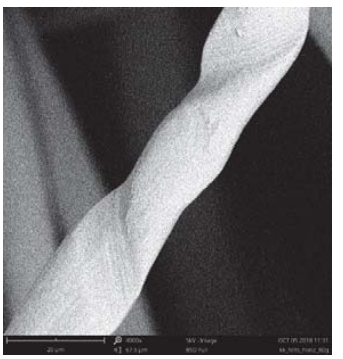
A természetes és mesterséges szálak tűzvédő hatását és lángterjedést gátló képességét széles körben vizsgálják a kutatók [6,7,8]. Kutatások folynak ezen szálas anyagok hőstabilitásának, mikro- és makroszerkezetük hatásainak tanulmányozására is [9,10,11]. Az *5-7. ábrákon* poliakrilnitril (PAN) -alapú oxidált szálakból előállított filcek SEM felvételein a szálakkal kapcsolatos anomáliákat mutatjuk be. Megfigyelhetők a végtermék (nem szövési eljárással előállított filc) előállítási technológiájának hatása a szál szerkezetére, valamint felületi szennyeződések. Mindezek befolyásolhatják az előállított végtermékek éghetőségi tulajdonságait, tűzvédő és lángterjedést gátló képességét.



5. ábra Egyedi szennyező szál szénszálas filcben (270 gm^2), nagyítás: 980



6. ábra Kristályos felületi szennyeződés szénszálon, (szénszálas filcben, 270 gm^2), nagyítás:2650

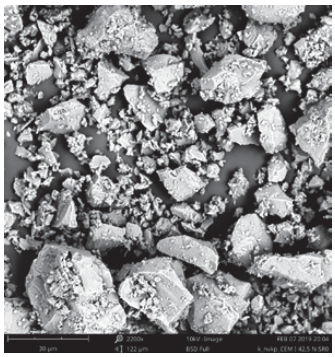


7. ábra Egyedi szál deformációja (szénszálas filc, 80 g/m^2), nagyítás:4000

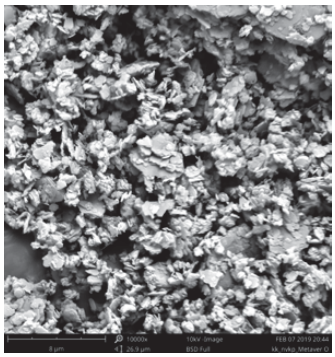
3. PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSZKÓPIA (SEM) ALKALMAZÁSA BETONBAN

3.1 Cement és cement kiegészítő anyagok

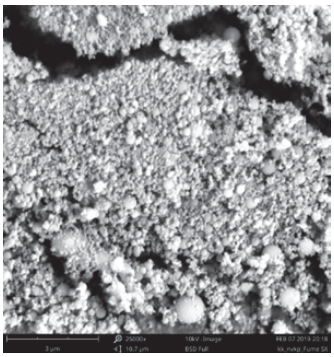
A portlandcement klinkert szulfáthordozóval (pl. gipsz) együtt őrülve kapjuk a különböző szilárdsági osztályú portlandcementeket. Az őrlés mechano-kémiai aktiválás, minél nagyobb az előállított Blaine-felület, annál nagyobb szilárdság érhető el a szabványos cementszilárdság vizsgálati eljárás során [12]. A cement kiegészítő anyagoknak (supplementary cementitious materials, SCMs) két csoportját különböztethetjük meg. Az I. típusú kiegészítő anyagok a közel inert kiegészítő anyagok (pl. mészkő liszt). A II. típusú kiegészítő anyagok a puccolános vagy latens hidraulikus tulajdonságú kiegészítő anyagok. Ez utóbbi csoportba tartozik az erőműi pernye, a szilikapor, az őrölt kohósalak és a metakaolin [13]. A *8. ábrán* CEM I 52,5 N portlandcement (nagyítás: 2200), a *9. ábrán* metakaolin (nagyítás:10000), a *10. ábrán* szilikapor (nagyítás: 25000) pásztázó elektronmikroszkópos felvétele látható. A cementek és cementkiegészítő anyagok betonban kifejtett aktivitását meghatározza az őrlésfinomság, a kristályos – amorf anyag részaránya, a szemcsék morfológiája (élek, sarkok, lemezes vagy szférikus alak, stb.), szemcseméret eloszlás stb. Pásztázó elektronmikroszkópos módszerrel mind a morfológia tanulmányozható, mind az egyedi szemcsék méretei meghatározhatók.



8. ábra CEM I 52,5 N portlandcement SEM felvétele, nagyítás: 2200



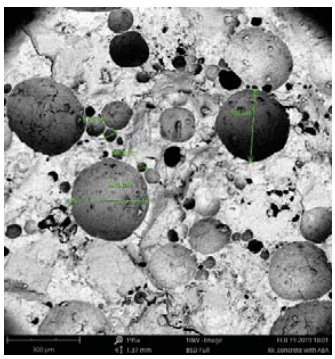
9. ábra Metakaolin SEM felvétele, nagyítás: 10000



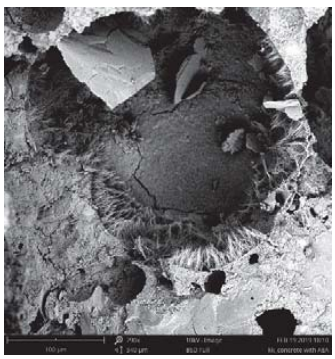
10. ábra Kiszárított szilika szuszpenzió SEM felvétele, nagyítás: 25000

3.2 Légbuborék képző szerek hatása

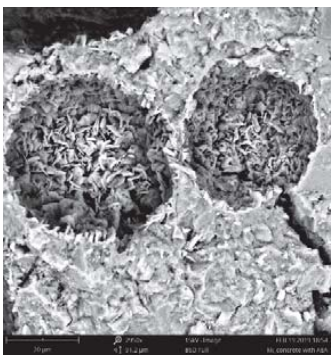
A légbuborék képző adalékszerekkel elsősorban a beton fagy- és olvasztósó állósága növelhető. Alkalmazásuk elsősorban az XF2 – XF4 környezeti osztályokban nélkülözhetetlen. A légbuborék képző hatás sok tényezőtől függ: a beton összetételétől, konzisztenciájától, a cement típusától, a légbuborék képző adalékszer adagolásától, a hőmérséklettől, a keverési módtól stb. [14].



11. ábra Légbuborékok betonban, átmérő: 20-300 mikron, nagyítás: 195



12. ábra Ettringit és portlandit képződés, mikrorepedés légbuborékban, nagyítás: 790

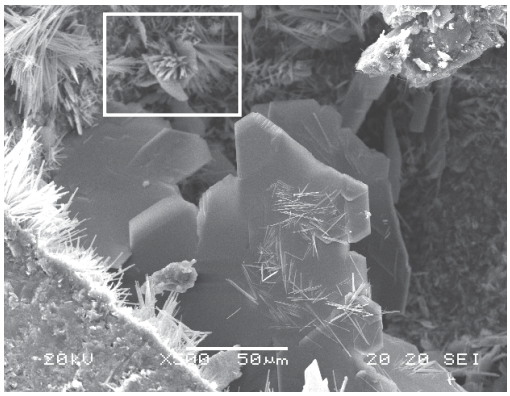


13. ábra Légbuborékok karbonátosodott felülete és mikrorepedés, nagyítás: 2950

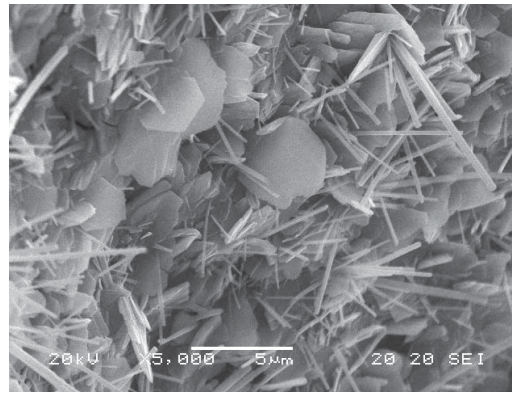
Pásztázó elektronmikroszkópos módszerrel jól tanulmányozható a kialakuló pórusrendszer, amelyben a szabályos szférikus légbuborékok jól megkülönböztethetők a mikrorepedésektől vagy kapilláris porozitástól. A *11. ábrán* jól láthatók a beton szövetszerkezetében kialakult légbuborékok. Fagy- és olvasztósó állóság szempontjából a 0,01 mm és 0,3 mm közötti átmérővel rendelkező légbuborékok hatásosak [15]. A *12. ábrán* a légbuborékban ettringit és portlandit, a *13. ábrán* kalcit képződése figyelhető meg. A cementkő pórusaiban, a légbuborékokban vagy légzárványokban jól tanulmányozhatók a cement hidratációs folyamatának fázisai [16].

3.3 Cementek kloridion megkötő képessége

A cementkő aluminát fázisai a sózás hatására a kloridionok egy részét kémiailag kötött formában megkötheti. Felfedezőjéről a keletkező vegyületet Friedel-sónak nevezzük [17]. A Friedel-só és a kalciumhidroxid hexagonális rendszerű kristályait (lemezeit, lapjait) a méretük alapján lehet megkülönböztetni. Míg a Friedel-só mérete a cementpépekben néhány mikrométer, a portlandit jóval nagyobb kristályokat képez. Ilyen nagyméretű, jól kristályosodott portlandit kristályok láthatók a *14. ábra* közepén. A monoszulfát mérete a kettő közé esik, és jelenléte általában az elsődleges ettringittel társul. A *14. ábra* kiemelt része az ettringit – monoszulfát átalakulást jelzi. A *15. ábrán* 5000-szeres nagyításban látható a sókezelt, 180 napos korú CEM III/A 32,5 cementpép minta részlete. Együtt nőtt lemezes szerkezetű, hexagonális Friedel-só és tű alakú ettringit kristályok ismerhetők fel az ábrán. A Friedel-só lemezek morfológiája és mérete megegyezik az irodalmi adatokkal [18]. A kloridtartalmú AFm és a szulfát tartalmú AFt fázis együttes létezése is bizonyítja, hogy a kloridionok megkötésekor a szulfátcsoport felszabadulása másodlagos ettringit képződéshez vezet. [16].



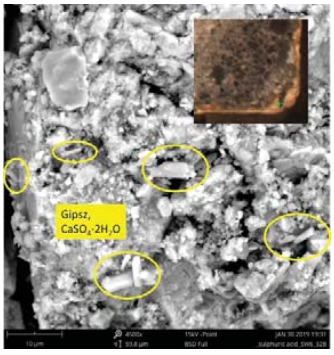
14. ábra CEM III/A 32,5 cementpép SEM felvétele, nagyítás: 500x, 20 ºC-on szilárdult, sókezelt, 180 napos minta [16]



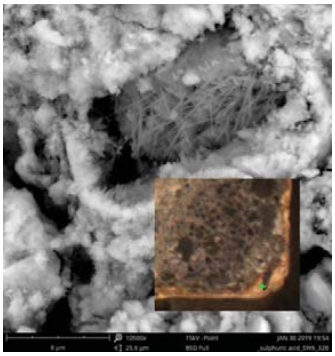
15. ábra CEM III/A 32,5 cementpép SEM felvétele, nagyítás: 5000x, 20 ºC-on szilárdult, sókezelt, 180 napos minta [16]

3.4 Beton kémiai ellenállóképessége

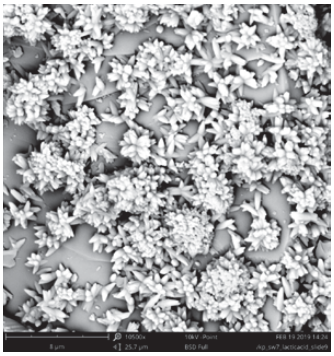
A savas környezet hatásának mértéke a beton porozitásával is befolyásolható, ezáltal a korróziós kockázat csökkenthető. Minél kisebb az összporozitás, annál kisebb lesz a savas környezet hatása a betonra. Általánosságban elmondható, hogy minden nagy teljesítőképességű betonkeverék nagyobb ellenállást mutat a savas támadással szemben, mint a szokásos (normál) betonok [19]. A nagy teljesítőképességű beton áteresztőképessége kicsiny, így a környezetből származó károsító komponensek diffúziója is csökken [20]. A *16. és 17. ábrán* kénsavas kezelés (modellkísérlet) során, a beton felületi rétegeiben keletkező gipsz és másodlagos ettringit képződés figyelhető meg. A *18. ábrán* tejsavas kezelést követően keletkező kalcium-laktát kristályok tanulmányozhatók. A kalcium-laktát kristályok mélyen, a beton belső szerkezetében található porozitásban is kimutathatók.



16. ábra Gipsz kristályok képződése betonban kénsavas kezelés hatására, nagyítás: 4500



17. ábra Másodlagos ettringit képződése betonban kénsavas kezelés hatására, nagyítás: 10500



18. ábra Ca-laktát kristályok képződése betonban tejsavas kezelés hatására, nagyítás: 10500

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben betekintést adtunk a pásztázó elektronmikroszkópia segítségével: korábbi és jelenleg is folyó kutatásokban használatos anyagok, szálak, szálas anyagok, cement és cement kiegészítő anyagok morfológiájával kapcsolatosan, légbuborék képző adalékszer hatásával, valamint a beton kémiai ellenálló képességének vizsgálatával kapcsolatos megfigyelésekről.

A bemutatott pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelésekre jelentős részben az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázat keretében beszerzett PHENOM XL elektronmikroszkóp segítségével nyílt lehetőségünk.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

HIVATKOZÁSOK

[1] https://www.thoughtco.com/history-of-the-microscope-1992146, letöltés időpontja:
[2] Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai (Budapest, 1994)
[3] Goldstein, J. (2003), Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Springer. ISBN 978-0-306-47292-3. pp. 297-353.
[4] Lublóy É, Balázs Gy. L. Post-heating strength of fiber-reinforced concretes FIRE SAFETY JOURNAL 49: pp. 100-106. (2012)
[5] Kopecskó, K., 2004. Durability of glass fibres, in: di Prisco, M.; Felicetti, R. and Plizzari, G.A. (Eds.), Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. RILEM Publications SARL, pp. 583–592
[6] Johnson, R. J. & Moore R. D. (1976). Effect of Phosphorus and Bromine on Burning Rates for Cotton and a Polyester /Cotton Blend. Textile Research Journal, 43 (10), 561:567.
[7] Miller, B., Martin, J.R., Meiser, C.H. & Gargiullo, M. (1976). The Flammability of Polyester-Cotton Mixtures. Textile Research Journal, 46 (7), pp. 530-538.
[8] Donnet J.-B., Wang T.K., Peng J.C.M. and Rebouillat S., eds. (1998). Carbon fibers, Third Edition. New York: Marcel Dekker. [A comprehensive survey of carbon fibers.] p. 573.
[9] Burkanudeen, A., Krishnan, G.S., Murali, N. (2013). Thermal behavior of carbon fibre precursor polymers with different stereoregularities, J Therm Anal Calorim Vol:112. pp. 1261-1268.
[10] Yongping, Hou., Y., Sun, T., Wang, H. & Wu, D. (2008). Effect of Heating Rate on the Chemical Reaction during Stabilization of polyacrylonitrile. Fibres Textile Research Journal, 78 (9), pp. 806-811.

[11] Kerekes, Zs., Lublóy, É. (2018). Effect of thermal transformation and stability on the flammability of PAN precursors-based carbon fibres. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, DOI: 10.1007/s10973-018-7136-8
[12] MSZ EN 196-1: 2005 Cementvizsgálati módszerek. 1. rész: A szilárdság meghatározása
[13] V. Sata, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete", Construct. Build. Mater. Vol. 21(7), pp. 1589–1598, 2007.
[14] http://www.betonopus.hu/notesz/fogalomtar/49-50-adalekszerek.pdf, letöltés dátuma: 2019. május 17.
[15] MSZ EN 480-11:2006 Adalékszerek betonhoz, habarcshoz és injektálóhabarcshoz. Vizsgálati módszerek. 11. rész: A megszilárdult beton légbuborék-jellemzőinek meghatározása
[16] Kopecskó K. (2006). A gőzölés hatás a cement klinkerek és cementek kloridion megkötő képességére. PhD értekezés. p. 100.
[17] Friedel, P. M. (1897), „Sur un Chloro-aluminate de Calcium Hydraté se Maclant par Compression", Bulletin Soc. Franc. Minéral, Vol 19, pp. 122-136.
[18] Luo, R.; Cai, Y.; Wang, C. and Huang, X. (2003), „A study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete", Cement and Concrete Research, Vol 33 (1), pp. 1-7.
[19] R.D. Woodson, "Concrete Structures: Protection, Repair and Rehabilitation", ISBN 1856175499, 9781856175494, Butterworth-Heinemann, 2009.
[20] C. Shi, Y.L. Mo, "High-Performance Construction Materials Sciences and Applications," World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2008.

BEHAVIOR OF ALKALI ACTIVATED BINDERS

Katalin Kopecskó[1], Mátyás Hajdu[2] and György L. Balázs[3]

[1] Budapest Univ. of Techn. and Economics, Dept. of Eng. Geology and Geotechnics, Hungary;
[2] ARC-S Engineering & Design Ltd., Hungary;
[3] Budapest Univ. of Techn. and Economics, Dept. of Constr. Materials and Technologies, Hungary

Corresponding author email: kopecsko.katalin@epito.bme.hu

Abstract

Aim of our study was to find optimal geopolymer binder compositions produced by commercially available materials or local industrial byproducts. In the present study different mixtures of alkali activated binders were studied, where a series of Na-based flyash-GGBS binders were created. The research plan was directed to optimise the compositions of binders. During the present research, we have successfully produced geopolymer type binders with properties of varying on a wide range, with recognizable and definite connections of compositions. The aim of our study was to find composition of optimal geopolymer binder used by materials available commercially or as secondary sources. Compressive strengths of mixtures hardened at room temperature ranged from 7.37 to 91.70 MPa at the age of 7 days. The development of strengths is in clear function of the components and proportions of the blends. Heat treatment accelerated the chemical reaction in geopolymers, and had a strength-enhancing effect in all mixtures. The maximum strength achieved by heat treatment at the age of 7 days was 110.40 MPa. The strength of the material was increased by the higher Blaine surface of the GGBS. The optimum proportions of the alkali fluid were the intermediate ratios: $SiO_2/Na_2O = 2$. The higher dosage of GGBS increased the strength of the geopolymers. High rates of shrinkage resulted in cracks with the consequence of lower strength. In the case, when sieved Visonta flyash is prepared for mixing, the flyash content can be maximized by 30% to 50% in addition to the blast furnace slag.

Keywords: Alkali activated binder, AAM, Flyash, GGBS, Geopolymer.

1. Introduction

Geopolymers as binders are considered as promising alternatives to conventional cements. In contrary to the well-known cement hardening processes, the hardening of geopolymers is different. As the cement binding is mainly based on hydration by producing Calcium-Silicate-Hydrates (CSH) and Portlandite (Ca(OH)2) as well as producing Calcium Aluminate Hydrates (CAH), geopolymers are hardening through policondensation by producing polymer structure in forms of chaines, rings or meshes (Davidovits, 1999).

Most pozzolanic material (flyash, blastfurnace slag, metakaolin, waste glass powder, red mud) is suitable to produce geopolymeric concrete. Most of these are industrial waste or industrial by-products. For the production of geopolymer cement, materials already burned are used, so that way approximately 80% less carbon dioxide emissions can be achieved and also the energy consumption is less as for the conventional cement production (Mucsi et al., 2010; Mucsi et al., 2017) (Ghosh et al., 2013).

In the materials generated by the geopolymerization, the amount of Al-Si depends on the ratio of the successful dissolution of the Al-Si containing raw material. The rate of dissolution depends on the proportion of the glassy phase of alumino silicate oxide and the composition and concentration of the alkaline solution (Davidovits, 2005).

The term „geopolymer“ was introduced by Joseph Davidovits (1993). In the topic of alkali-activated materials Glukhovsky (1959), Krivenko (1986), Davidovits (1991), Palomo and Glasser (1992) did pioneering work in addition to many other researchers. There are many hystorical and

technical reviews available (Roy, 1999; Krivenko et al., 2006; Pacheco-Torgal et al., 2008; Provis and Bernal, 2015; Palomo et al., 2014; Živica et al, 2014; Luukkonen et al., 2018).

The Al/Si ratio of the molecules plays a decisive role in determining the binding properties and the material quality of the geopolymer as there is a clear correlation between the different proportions and the material properties. This is because the polymer chain developes in a different structure for different proportions, i.e. periodicity of the Si-Al in the chain varies.

Davidovits (2002) proposed the following terminology for the three basic forms of geopolymers:

- Si:Al=1 poly(sialate) (PS);
- Si:Al=2 poly(sialate-siloxo) (PSS);
- Si:Al=3 poly(sialate-disiloxo) (PSDS) (Chouhan et al., 2013).

Chains and rings from these associations form the amorphous and semi-crystalline structure of the solids. There may also be a case that the ratio exceeds Si:Al > 3, whereupon the polymer structure may develop. This is called sialate link or bridge, where Si-O-Al is linking two polysialate or polysialate chains. Sialate bridge crosslinking multiple silicate associations (Davidovits, 2002).

During the development of the geopolymers, first, a kind of refractory material was aimed, which can be formed at room temperature. The utilization of industrial wastes as secondary raw materials was considered later, as an alternative to the chemical process. Therefore, wide range of raw materials is tested in the production of geopolymers. There are many kinds of substances, but only some of them can be considered as promising material (for economic, environmental or other reasons) (Davidovits, 2013).

From the point of view of construction sector, suitable or applicable combinations of geopolymers can be grouped as follows:

(i) Slag-based geopolymers. The first functional slag-based geopolymer cement was patented by Davidovits and Sawyer in 1984 under the name of Pyrament cement (Davidovits, 1999). Essential components of this are metakaolin, blastfurnace slag and alkaline silicate solutions. The purpose of development of geopolymeric materials as cement substituting materials is twofold: to reduce environmental and economic impacts as well as to enhance durability performance of cementitious materials.

(ii) Rock-based geopolymer. Looking for a more economical and CO_2-friendly design. In this type, metakaolin is partially replaced by volcanic tuffs, which was chosen because of its glassy structure. Thus, its components are: metakaolin, slag, volcanic ash, alkali silicate solution.

(iii) Flyash-based geopolymer. Currently, two basic types are distinguished among flyash-based geopolymers. In the first case the raw material is activated by a strong alkaline alkali silica solution, then a zeolite-type solidification can occur. In the second case in addition to the flyash, the more active slag is given, which can be used to initiate polycondensation. In such cases Davidovits declares that the use of potassium water glass is more efficient. The volcanic tuff in the "rock-based" geopolymers can also be replaced by flyash, which results in a kind of flyash slag-based geopolymer. This mixture typically does not contain metakaolin (Pacheco-Torgal et al., 2008).

The aim of our study was to find composition of optimal geopolymer binder used by materials available commercially or as secondary sources. Toward, tests of selected geopolymer binders in geopolymer matrices (mortars) were also aimed.

2. Experimental

The experiments were carried out in two parts. In the first part a wide range of geopolymer binders were elaborated. In a second part of the study the performance of binders in composite forms (geopolymer mortars) were studied.

Test specimens of binders were prepared with size of 30x30x30 mm. Measured characteristics of specimens presented herein are always averages of 5 values.

2.1. Materials

Materials applied in this research can be classified into two groups:

(i) commercial products, which are standardized materials – liquid potassium (K) or sodium (Na) silicate (Kemikál Ltd.), filtered flyash Microsit 20;

(ii) industrial byproducts used as secondary raw materials – ground granulated blastfurnace slag (Duna-Dráva Cement Ltd. HeidelbergCement Group), Hungarian lignite flyash of Visonta (Mátrai Power Plant Ltd.). Blastfurnace slag was ground at laboratory conditions to achieve the proper Blaine surfaces (3500 and 4500 m^2/g. Lignite flyash was homoganised in the laboratory by sieving.

2.1.1. Solid materials of binders

In this section the important properties of the solid materials were collected.

Filtered flyash Microsit 20 (producer: NewChem AG, supplier: Meselia Hungaria Ltd.). Composition: SiO^2 52%, Al_2O_3 25%, Fe_2O_3 7%, CaO 5%, LOI 3.4% (EN 196, part2). Particle shape: spherical; Blaine value: 6000 cm^2/g; Specific density: 2.50 g/cm^3, d_{50}: 6 μm, d_{95}: 20 μm. Sign of the Filtered flyash Microsit 20 within these experiments is "F".

Visonta lignite flyash (producer: Mátrai Power Plant Ltd.). Composition: SiO_2 46.20%, Al_2O_3 9.35%, Fe_2O_3 10.00% (SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3% ≥ 65%), K_2O 0.87%, Na_2O 0.20%, MgO 2.10% (≤ 4.0%), reactive CaO 8.27% (≤ 10.0%), free CaO ~0.00% (≤ 2.5%), SO_3 4.60% (≤ 3.0%), LOI 2.19 (≤ 5.0%), pH 11.5. The reference values are the limits written in the standard MSZ EN 450-1:2013. Sign of the Visonta lignite flyash during the experiments is "V".

GGBS (producer: Duna-Dráva Cement Ltd. HeidelbergCement Group), SiO_2 35.32%, Al_2O_3 8.35%, Fe_2O_3 0.28%, CaO 39.14%, MnO 0.61%, TiO_2 0.34%, MgO 8.88%, SO_3 1.96%, K_2O 0.76%, Na_2O 0.31%, CaO+MgO+SiO_2 (>66%) 83.34%. During the experiments GGBS was used with two different Blaine finenesses: 4500 or 3500 m^2/g. Sign of the GGBS during the experiments is "S".

2.1.2. Alkali liquids of binders

In this section the important properties of the liquid parts of the binders are collected.

Sodium silicate water glass: 36.0-36.5 m% solution; grade of sodium silicate by their SiO_2:Na_2O molar ratio is 3.0-3.5; Baumè: 35.7-38.0 Be°; pH < 11.5.

NaOH (sodium hydroxid) solutions: in addition to the sodium silicate water glass solutions 8-12 mol concentrated solutions of alkalimetal hydroxid were used for the different binders. The role of the alkalimetal hydroxid solution is to increase the alkalinity (pH value) as well as to activate (depolymerize) the solid raw materials of binders.

2.1.3. Preparation and curing of specimens

Materials were mixed in HOBART mixer. For each mixture two groups of specimens were prepared: (i) hardened at room temperature (20±2 °C) or (ii) heat cured. Both groups were studied at the same ages. Specimens were demoulded at the age of 24 hours. After further 24 hours of conditioning heat cured group of specimens were kept in drying chamber for 24 hours at 60 °C. All specimens were wrapped and closed into a polymer bag to avoid desiccation. The purpose was not to allow for the specimens drying out, but keeping at higher temperature to accelerate the chemical reaction. Without sealing, the specimens would be cracked. There was no wet curing applied.

2.2. Experiments on geopolymer binders

As a result of an optimization process three series (groups) of binders were studied. In the first (A) series Na-type geopolymer binders were studied, where Na indicates the polimerization made of sodium water glass and NaOH solutions. In the second (B) group K-type geopolymer binders were studied, where K indicates the polimerization made of potassium water glass and KOH solutions. In series of A and B flyash-slag based geopolymers were mixed. In the third (C) series slag based geopolymer was tested, where instead of flyash metakaolin was used.

In this paper the mixing procedure and test result of Series A is reported.

The experimental plan of the Test Series A can be found in Table 1. An example for the designation of the different mixtures is: "F-S-A-I/1", where F is one component of the solid part in the mixture (here F is filtered flyash Microsit 20); S is another component of the solid part in the mixture (S is GGBS); finally A-I/1 is the first mixture (recipe) of the Series A-I.

Purpose of Test Series A-I was to study the influence of sodium (Na) content (concentration of alkali solution) on the hardening and performance. Compressive strength and density were determined at the ages of 3, 7 and 28 days.

Purpose of Test Series A-II was to study the optimal water content in alkali liquid on the hardening and performance. Compressive strength and density was determined at the ages of 3 and 7 days.

In case of Test Series A-III the question was how the strength, density and fire resistance would be affected by the change of GGBS/flyash ratio. Compressive strength and density was determined at the ages of 3, 7 and 28 days.

In Test Series A-IV GGBS with lower Blaine fineness was applied and studied its influence on compressive strength and density.

In Series Test A-V the Visonta lignite flyash was used. This type of flyash is not the optimal raw material preparing geopolymer binder, but by its utilization a considerable environmental would be solved in an economic way. In this series the best GGBS (Visonta) flyash mixture was aimed. Compressive strength and density were determined at the ages of 3 and 7 days.

In Test Series A-VI binders were prepared either 100% of flyash (Microsit 20) or GGBS. Compressive strength and density were determined at the ages of 3, 7 and 28 days.

2.3. Experiments with geopolymer mortars

Purpose of this part of study was to develop mortar mixtures without traditional cement as binder. The best performed binders are selected for mortar mixtures. Results on geopolymer mortar mixtures will be reported in a separate paper.

Table 1. Na-silicate activated geopolymer binders (variables are in bold).

Ratios of Na-silicate activated GGBS(S)-flyash(F) geopolymer binders					
Nr. of Series	Sign of mixture	H_2O/GP solid, %	SiO_2/Na_2O in the alkali liquid	S/F mass ratio	Blaine of GGBS (cm^2/g)
A-I.	F-S-A-I.1	25	**only NaOH**	30/70	4500
	F-S-A-I.2		**1.5**		
	F-S-A-I.3		**2.0**		
	F-S-A-I.4		**2.5**		
	F-S-A-I.5		**3.0***		
A-II.	F-S-A-II.1	**30**	1.5	30/70	
	F-S-A-II.2	**25**			
	F-S-A-II.3	**20**			
A-III.	F-S-A-III.1	25	2.0	**10/90**	
	F-S-A-III.2			**30/70**	
	F-S-A-III.3			**50/50**	
	F-S-A-III.4			**70/30**	
A-IV.	F-S-A-IV.1	25	2.0	70/30	**3500**
A-V.	F-S-A-V.1	35	2.0	**30/70**	3500
	F-S-A-V.2			**50/50**	
	F-S-A-V.3			**70/30**	
A-VI.	F-A-VI.1	25	2.0	**0/100 (F)**	
	S-A-VI.2			**100/0 (S)**	

3. Results and Discussion

3.1. Rate of hardening – development of compressive strength

Geopolymers are characterized by their fast binding mechanism, resulting in a significant part of their strength up to the age of 7 days. As a result, some of the researchers (Patankar et al., 2015) define geopolymer strengths typically at 7 days, so in our study 28-day tests are not generally performed. However, since standard cement and concrete tests are carried out at the age of 28 days, we have also tested some of the mixtures at this age for comparison (Table 2.).

Table 2. Compressive strength of geopolymer binders hardened at room temperature.

Compressive strength of geopolymer binders hardened at room temperature										
Age, days	Sign of the binder									
	F-S-A-I.1		F-S-A-I.2		F-S-A-I.3		F-S-A-I.4		F-S-A-I.5	
	Compressive strength, MPa – Rate of the hardening, %									
3	3.91	54.2	33.02	57.0	41.60	58.3	34.29	53.2	5.01	35.3
7	7.37	102.2	47.09	81.3	58.20	81.6	52.98	82.2	11.43	80.5
28	7.21	100.0	57.93	100.0	71.32	100.0	64.46	100.0	14.19	100.0

Age, days	Sign of the binder											
	F-A-VI.1		F-S-A-III.1		F-S-A-III.2		F-S-A-III.3		F-S-A-III.4		S-A-VI.2	
	Compressive strength, MPa – Rate of the hardening, %											
3	4.4	40.0	10.3	51.7	33.0	57.0	49.4	64,4	61.3	51.8	82.5	73.3
7	8.4	75.9	16.3	82.2	47.1	81.3	68.8	89,7	96.2	81.4	91.7	81.5
28	11.1	100.0	19.8	100.0	57.9	100.0	76.6	100.0	118.3	100.0	112.5	100.0

3.2. Influence of variables on rate of hardening

3.2.1. Molar ratio of alkali liquid

In Series A-I the degree of alkalinity of the alkali liquid varied. Results showed lower rate of solidification in case of high concentration of alkali liquids (with high Na content, e.g. F-S-A-I.1) or in case of mixtures activated with alkali silicates without mixing with alkali-hydroxide solution (e.g. F-S-A-I.5) (Fig. 1).

The best performance of mixtures was achieved when the SiO_2/Na_2O ratio in the alkali liquid was kept 2.0.

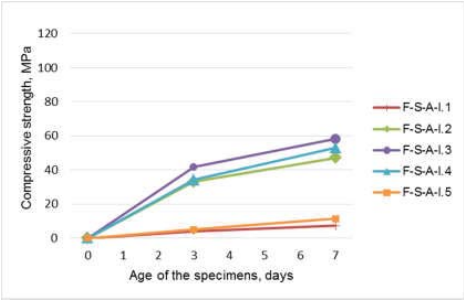


Figure 1. Effect of the alkalinity (molar ratio SiO_2/Na_2O in the alkali liquid) on compressive strength, Series A-I

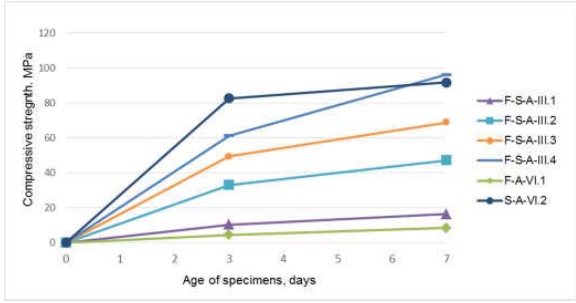


Figure 2. Effect of GGBS ratio in the solid on compressive strength, Series A-III and A.VI.

3.2.2. Water content

In Test Series A-II the water content varies (20, 25 or 30%). The medium water content (25%) found optimal, since it provided for the mixture considerable consistency (the mixture was not difficult to mix), as well as the compressive strength of the mixture was satisfactory.

3.2.3. Ratio of GGBS in the solid of binders

With Test Series A-III and A-VI a full scale of GGBS substitution (from 0% to 100%) is generated. The strength of the products increases with the slag content since it is a readily depolymerizable material. Then it hardens quickly. This caused often difficulties during casting, as the setting begins in some minutes in case of mixture made with larger dosage of GGBS.

However, as the consequence of the visually observed cracks caused by drying shrinkage, the

strength of the blends with increasing GGBS dosages drops. For instant the 7-day strength of S-A-VI.2 (100% GGBS) mixture is smaller than that of F-S-A-II.4 (70% GGBS, 30% Microsit 20 flyash) (Fig. 2). It should be noted that the size of the specimens is small, 30x30x30 mm, so the extent of the shrinkage does not cause the same macroscopic and microstructural defects as in a large scale elements. This sensitivity can be moderated by addition of aggregates.

3.2.4. Fineness of GGBS

The hardening process with the GGBS of smaller specific surface area (Blaine 3500 m^2/g) was faster, but its final measured strength remained below the strength of the mixture where GGBS with larger specific surface area (Blaine 4500m^2/g) was used. The reason for this may be that due to the smaller specific surface, the alkali liquid can more easily reach and wet the granules, which quickly initiates the bond, but the finer slag can be more completely activated (F-S-A-III.4: 4500 m^2/g GGBS; F-S-A-IV.1: 3500 m^2/g GGBS. GGBS/flyash ratios were the same: 70/30) (Fig. 3). The development of density shows the same tendency (Fig. 4).

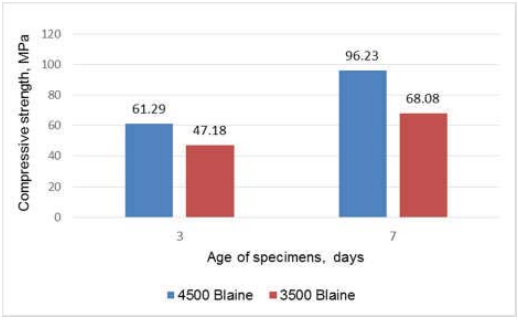


Figure 3. Effect of GGBS Blaine fineness on compressive strength, measured on specimens of F-S-A-III.4 and F-S-A-IV.1 mixtures.

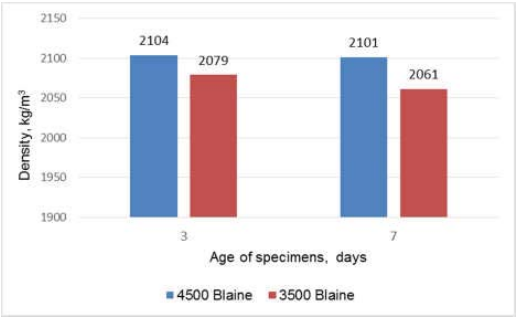


Figure 4. Influence of GGBS Blaine fineness on density, measured on specimens of F-S-A-III.4 and F-S-A-IV.1 mixtures.

3.2.5. Influence of heat curing

In most cases, the heat curing accelerates the hardening and increase the strength in varying degrees, so we can state, that thermal treatment undoubtedly has a beneficial effect on the development of geopolymerization. Higher temperature enhances chemical transformation.

Due to heat-curing the water can release faster of the specimens. The densities of the heat-cured specimens are lower as the densities of the non heat-cured specimens (Fig. 5).

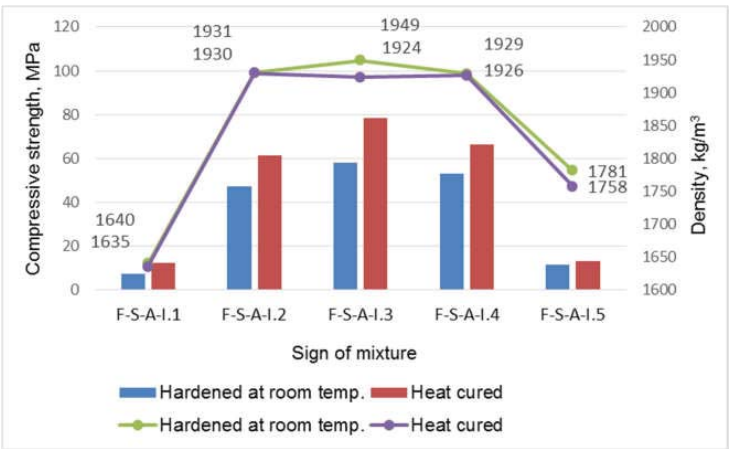


Figure 5. Influence of heat curing on compressive strength and density, mixtures of Series A-I at the age of 7 days.

3.3. Shrinkage

The shrinkage typically manifests in micro- or macrocracks. Cracking was found to occur in the presence of larger dosages of blastfurnace slags. If aggregate is present, specimens can be avoided from larger shrinkage. Interestingly, part of the particles found in the Visonta lignite flyash is acting practically as inert additives, so in these mixtures shrinkage has decreased. In mixtures, where high-quality filtered flyash (Microsit 20) was used cracks are formed at the presence of GGBS content over 50% (F-S-A-III.3, F-S-A-III.4, F-A-VI.1, S-A-VI.2). Using Visonta flyash, even with 70% GGBS substitution, no considerable shrinkage occurred (Series A-V) (Fig. 6, Fig. 7).



F-A-VI.1 (without cracking, 100% F)	S-A-VI.2 (cracked GGBS GP, 100% S)

Figure 6. Influence of high GGBS on shrinkage and cracking, mixtures of F-A-VI.1 and S-A-VI.2.



F-S-A-V.3 (uncracked GP with 70% GGBS and 30% V)

Figure 7. GP with Visonta flyash and GGBS, mixture of F-S-A-V.3.

The largest shrinkage values were found in case of mixture consists of 100% slag. In case of mixture consist of 100% flyash (filtered Microsit 20 flyash) the much smaller extent of shrinkage did not cause visible cracking.

4. Conclusions

In this study different alkali activated, Na-based flyash-GGBS binders were created and tested.

Based on the results the following conclusions have been drawn:

- For economic and environmental purposes the applicability of Hungarian Visonta lignite flyash was studied. Visonta lignite flyash is difficult to geopolymerize, because its low glassy part as well as it contains high amount inert particles and has high water absorption. Viscosity can be effectively improved with addition of GGBS
- Materials with high amount glassy (amorphous) parts (filtered flyash Microsit 20, GGBS, metakaolin), unlike the Visonta flyash, are easily formed GP gel phase.
- Without additives, in the case of high GGBS content, the well-geopolymerizable materials shrink more, resulting in drying shrinkage cracks, even on the small test specimens.
- Shrinkage caused by high GGBS content can be reduced by adding Visonta flyash, which can be considered as inappropriate geopolymer raw materials due to the presence of a large number of particles that are not involved in the chemical reaction.
- Compressive strengths of mixtures hardened at room temperature ranged from 7.37 to 91.70 MPa at the age of 7 days. The development of strengths is in clear function of the components and proportions of the blends.
- Specimens of geopolymer binders reach approximately 80% of their 28-day strength at the age 7 days.
- For GGBS – flyash geopolymers, the 25% water content was found to be optimal.
- The strength of the material was increased by the higher Blaine surface of the GGBS.
- The optimum proportions of the alkali fluid were the intermediate ratios: $SiO_2/Na_2O = 2$.

- The higher dosage of GGBS increased the strength of the geopolymers.
- High rates of shrinkage resulted in cracks, which interrupt material homogeneity with the consequence of lower strength.
- In the case, when sieved Visonta flyash is prepared for mixing, the flyash content can be maximized by 30% to 50% in addition to the blast furnace slag.
- Heat treatment is accelerating the chemical reaction in geopolymers, and it has a strength-enhancing effect in all other mixtures. The maximum strength achieved by heat treatment at the age of 7 days was 110.40 MPa.

Acknowledgements

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 "Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw".

References

Chouhan, N., Kumar, A., Sharma, A. & Ameta, R., "Eco-friendly products", in: Green Chemistry: Fundamentals and Applications, Eds.: Ameta, S.C. and Ameta, R., 2013, pp. 66-68.

Davidovits, J., "Geopolymers - Inorganic polymeric new materials", J. Therm. Anal., 37, 1991, pp. 1633-1656

Davidovits, J., "Chemistry of geopolymeric systems terminology", In: Geopolymer '99, Second International Conference, Eds.: Davidovits, J., Davidovits, R. and James, C., France (1999), pp 9-40.

Davidovits, J., "Geopolymer Cements to Minimise Carbon Dioxide Greenhouse Warming", Ceramic Transactions, 37, 1993, 165-182.

Davidovits, J., "30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications", Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Australia, 2002

Davidovits, J., "A review on Geopolymer cement, as of January 2013." Geopolymer Cement, 2013., https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/21-geopolymer-cement-review-2013/

Ghosh, R., Kumar, A. & Kumar, S., "Flyash Geopolymer Concrete as Future Concrete", International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, Issue 3 volume 6, Nov.-Dec. 2013

Glukhovsky, V.D. "Soil silicates", Kiev, USSR: Gostroiizdat Publish; 1959.

Krivenko, P.V., "Synthesis of Cementitious Materials of the Me2O-MeO-Me2O3-SiO2- H2O System with Required Properties", D.Sc. (Eng) Thesis, KISI Public, Kiev 1986

Krivenko, P.V., Shi, C. & Roy, D., "Alkali-Activated Cements and Concretes", Taylor & Francis. 2006.

Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P. & Illikainen, M., "One-part alkali-activated materials: A review", Cement and Concrete Research, 103, 2018, 21-34.

Mucsi, G., Csőke, B. & Molnár, Z., "Laboratory investigation of geopolymer production from industrial waste materials", In: XII. Int. Mineral Processing Symp. Proc. Turkey, 2010, pp 1235-1242.

Mucsi, G., Szabó, R., Kristály, F. & Gombkötő, I., "Combined utilization of various silicate bearing wastes", In: Meddő? Hulladék? NEM! HASZONANYAG! (In Hungarian: "Mullock? Waste? NO! SECONDARY SOURCE!"), Eds: Török, Á., Puzder, T. & Görög, P., 2017, Hungary, Budapest, http://real.mtak.hu/63572/1/cikk_Mucsi%20et%20al%202017%20final_b.pdf

Pacheco-Torgal, F., Joao Castro-Gomes, J. & Jalali, S. "Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products", Construction and Building Materials 22, 2008, pp 1305–1314

Palomo, A. & Glasser, F.P., "Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin", Br. Ceram. Trans. J., 91, 1992, pp. 107-112

Palomo, A., Krivenko, P., García-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O. & Fernández-Jiménez, A., "A review on alkaline activation: new analytical perspectives", Mater. Constr., 64, 2014, pp. 140-159

Patankar, S.V., Ghugal, Y.M. & Jamkar, S.S., "Mix Design of Fly Ash Based Geopolymer Concrete", In: Advances in Structural Engineering: Materials, Volume Three, Ed.: Matsagar, V., 2015, pp 1619-1634.

Provis, J.L. & Bernal, S.A., "Milestones in the analysis of alkali-activated binders", J. Sustain. Cement-Based Mater., 4, 2015, pp. 74-84

Roy, D.M., "Alkali-activated cements Opportunities and challenges", Cem. Concr. Res., 29, 1999, pp. 249-254

Živica, V., Palou, M.T. & Krizma, M., "Geopolymer cements and their properties: a review", Building Research Journal, Vol. 61, 2014, No. 2, pp 85-100.

RATE OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF CONCRETE

Éva LUBLÓY[1], György L. BALÁZS[2]

1. Assoc. Prof. Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest, Hungary
2. Professor, Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Materials and Technologies, H-1521 Budapest, Hungary

Corresponding author email: balazs.gyorgy@epito.bme.hu

Abstract

Concrete itself belongs to the best structural materials resisting elevated temperatures. Rate of deterioration and type of deterioration mode depend on many parameters. All these parameters may influence safety of concrete and concrete elements.

An extensive experimental analysis laboratory test on small specimens at elevated temperatures as well as large scale fire tests on reinforced concrete elements have been carried out during our research with different compositions of concretes.

Both laboratory test results and also test results with elements indicated the importance of internal structure of concrete such as at elevated temperatures: strength, age of concrete, porosity, type of cement, type of aggregate, type of fibre for delay or avoid considerable reduction of capacity of concrete.

Keywords: *fire, concrete strength, structural fire resistance, precast structures.*

1. Introduction

Due a large number of fire cases, the design of reinforced concrete structures for fire attack has become more and more important. At high temperatures, the strength of concrete decreases due to physical and chemical changes. During the cooling process concrete is not able to regain its original properties. Damage of concrete at high temperatures has two forms: (1) local damage in the material itself and (2) global damage resulting the failure of the structural elements.

The following typical changes can occur in reinforced concrete structures during fire (Balázs and Lublóy, 2009):

- changes in the concrete material, which may be due to
- the different thermal expansion of the hardened cement paste and the aggregate,
- internal water vapour pressure,
- different temperature within the cross-section as well as along the length of the element,
- extreme deflections (including creep caused by high temperature and increased deflection caused by specific (relative) deformations,
- excessive cracking,
- the decrease of bond and anchorage between the concrete and reinforcement,
- spalling of concrete cover,
- reduction of load bearing capacity.

The structures which are not subjected to direct fire can be damaged too by deformations. Furthermore, explosive spalling of concrete structures may occur in the case of rapidly increasing temperature. The protection of the reinforcement can disappear due to explosive spalling of the concrete cover and the reinforcement can warm up fast. The reduction of the strength of the reinforcement may occur at high temperatures and the static behaviour of the structure may change.

Results of three prefabricated elements, one beam, one TT panel and one single layer wall panel, were examined. During the test, we compared a specimen with the originally designed composition and

a specimen with modified concrete composition, where polymer fibres were added to prevent spalling. Results of specimen with the originally designed composition and a specimen with modified concrete composition, were examined, were polymer fibres were added to prevent spalling.

2. Changes in reinforced concrete structures during fire

2.1. Changes in concrete material due to fire

Concrete is a composite material that consists mainly of mineral aggregates bound by a matrix of hydrated cement paste. The cement matrix is highly porous and contains a relatively large amount of free water. Concrete has excellent properties regarding of fire resistance compared to other constructions materials and can be used to shield other structural materials such as steel (Khoury, Grainger, and Sullivan, 1985).

When exposed it to high temperatures, concrete undergoes changes in its chemical composition, physical structure and water content. These changes occur primarily in the hardened cement paste in unsealed conditions. These changes are reflected by changes in the physical and mechanical properties of concrete that are associated with temperature increase.

Chemical changes can be studied by thermogravimetric analyses (TG/DTG/DTA). Chemical changes can be followed by thermogravimetric analyses (TG/DTG/DTA). The chemical transformations can be observed by the increase of temperature. Chemical changes can be studied by thermogravimetric analyses (TG/DTG/DTA): around 100 °C weight loss is caused by water evaporating from the micro pores. The decomposition of ettringite occurs between 50 °C and 110°C. Chemical changes can be studied by thermogravimetric analyses. At 200°C, there is dehydration of CSH fasen, which causes small weight loss. Chemical changes can be studied by thermogravimetric analyses (TG/DTG/DTA). Further weight loss was not perceptible around 250-300 °C (Khoury, Grainger, and Sullivan, 1985; Schneider, Weiß, 1997).

During heating, the endothermic dehydration of $Ca(OH)_2$ occurs between the temperatures of 450 °C and 550 °C ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O\uparrow$). In the case of concretes with quartz gravel aggregate, another influencing factor is the change of crystal structure of quartz α formation→ β formation at the temperature of 573 °C (Waubke, 1973).

Dehydration of calcium-silicate-hydrates was found at the temperature of 700 °C (Hinrichsmeyer, 1987):

The loss of compressive strength of concrete exposed to high temperatures is influenced by the following factors (Thielen, 1994):

(1) type of cement,
(2) type of aggregate,
(3) cement to aggregate ratio,
(4) water to cement ratio,
(5) the water content of concrete before exposing it to high temperatures and
(6) fire process.

The stress-strain relationship characterises the strength and deformation capacities of fire exposed concrete (Fig. 1). The test results showed slight creep of concrete which develops during the loaded period. In the case of strain-controlled tests, with increasing strain, a decrease of stress is observed after the peak stress has been reached (CEB,1991).

2.2. Spalling of concrete cover

According to the literature, there are several reasons for spalling. Studies (Hertz, 2005; Hertz, 2003; Kodur, Wang, Cheng, 2004; Kalifa, Menneteau, Quenard, 2000) have established that the reasons for the separation of the concrete surface are the following:

- release of water,
- thermal expansion of quartz aggregate,
- detachment of the aggregate,
- low tensile strength,

- dense reinforcement,
- rapid heating,
- asymmetric heating,
- thin structural parts of the cross-sections,
- cross-sections with variable thickness,
- clamped supports at the ends,
- stresses from the heat load,
- corners and rounded structural parts,
- prestressed and compressed parts,
- free water in the concrete,
- low permeability,
- water in the closed pores.

With advancement in of the concrete technology, we can create much denser concrete structure e.g. high-strength and self-compacting concrete (HSC and SCC).

The permeability of concrete has significant effect on fire induced spalling, due to their low permeability the HSCs experience higher levels of spalling than normal strength concretes (NSCs), where permeability is higher (Hertz, 2003).

In case of reinforced concrete structures, it is important to prevent spalling in case of fire, because the detachment of the surface decreases the fire resistance and load bearing capacity and it also makes the rescue work more difficult. Due to the detachment of the surface the failure of the structure occurs much earlier, as the steel bars are no longer protected and can warm up much faster, which leads to a very rapid loss of tensile strength.

Lot of experiments have shown that the risk of spalling is significantly lower when we use polymer fibers. This is because the pore structure formed during the burn out of the fiber network reduces the risk of crack formation (Dwaikat, Kodur, 2010; Kalifa, Chene, 2001; Hoj, 2005).

3. Test method

The experimental matrix for small and large specimens is given in Table 1.

Table 1. Experimental matrix

type of specimens	Name of mix	type of mix	temperature ranges	type of specimens
small specimens	T1 T2 T3	reference mix for I beam reference mix for TT panels reference mix for wall panels	20 °C, 150 °C, 300 °C, 500 °C, 800 °C	cubes prism
I beam	T1 T1m	reference mix with PP fibers and slag	standard fire curve	I beams
TT panels	T2 T2m	reference mix with PP fibers	standard fire curve	TT panels
wall elements	T3 T3m	reference mix with PP fibers	standard fire curve	wall elements

3.1. Test of small specimens

The specimens were kept in the formwork for 1 day then held under water until 7 days age, and then held on laboratory air conditions (20 ° C) up to 28 days age. The thermal loading started at 28 days age. 6 temperature steps were used: 20 °C, 150 °C, 300 °C, 500 °C, 800 °C. Each specimen was subjected to

the maximum thermal load for 120 minutes. After the thermal load, the specimens cooled down in laboratory air conditions (20 ± 3 °C). After cooling down we used the specimens for further tests. The compressive strength test was performed on thermally damaged and then cooled test cubes with 150×150×150 mm edge length. The compressive strength tests were done by an ALPHA 3-3000 S compression testing machine, the loading rate was 11.25 kN/s.

For the testing of flexural-tensile strength 250×70×70 mm prisms were exposed to a centric flexural-tensile strength test.

The planned concrete strength was C30/37 in case of I beams, C50/60 in case of the TT panels and C30/37 in case of the wall panels. The initial compressive strength values significantly exceeded the originally designed values, I beams C40/50, TT panels C50/60, wall panels C60/75. In case of the mixture designed for I beams and wall panels, the specimens exploded in the furnace after a thermal load of 500 °C, so their strength could not be measured and was taken as 0 N/mm^2.

3.2. Test of large specimens

In case of I beams and TT slab panels No recent publications are referred. fire resistance tests were carried out according to the MSZ pr EN 1365-2: 2012 standard. The standard fire load for buildings (MSZ EN 1992-1-2) was applied. During manufacturing, the 80 mm thick horizontal part of the 4600×1730×380 mm reinforced concrete TT slab panel was built with a 90 mm thick monolithic reinforced concrete layer on top (Figure 3). During the fire resistance test of the TT slab loads were applied on the thirds of the span, which acted together with the fire load. The magnitude of the line load was 139,0 kN (2 × 69,5 kN), which was calculated as the design load value from the accidental combination of actions (including fire as accidental action), on the basis of the MSZ EN 1991-1-2 standard. Four hydraulic jacks were used for loading, the loads were placed on the structure 15 minutes before the start of the fire resistance test, so that the redistribution of loads could occur before the test.

The wall panel specimens were tested according to the requirements of the MSZ EN 1365-1:2013 standard. The fire resistance of wall structures consisting of columns and wall panels was examined with loads applied in the longitudinal axes of the columns, which acted together with the fire load. The magnitude of the centric load on the columns was 10 kN, which was the calculated design load from accidental load combination (including fire as accidental load) in accordance with the MSZ EN 1991-1-2 standard. During the test three single-layer (homogeneous) reinforced concrete wall panels and two load-bearing reinforced concrete columns were installed. The experts of the manufacturer placed first the two reinforced concrete columns in the steel test frame, which were fixed to the bottom part of the frame by flat and L steel profiles. After that, the single layer, 200 mm thick reinforced concrete wall panels were placed between the columns which had 400×400 mm cross-section and height of 3450 mm.

Test **beam** with reference mix (T1) failed in 12 minutes owing to the complete spalling of concrete cover of the web. Test beam including 1 kg/m^3 polypropylene fibres (T1m) and slag as filling material failed in 70 minutes in shear (without spalling of concrete cover).

The **TT slab panel** test was first carried out with the original concrete mixture prepared by the manufacturer (T2), and after that with a mixture proposed by us. During the change of the composition, addition of polymer fibres with amount of 1 kg/m^3 (T2m) was suggested to avoid spalling of concrete. During the fire resistance test of the two TT slabs, we found that in both cases (original and modified mixture) insulation criteria was. In both tests, the middle section had the highest increase in temperature, therefore we show the increase of temperature at this point. During the test with the original mixture, the measured fire resistance was REI 60 and the fire resistance of the element with the modified mixture changed to REI 90.

The **wall panel element** test was first carried out with the original composition prepared by the producer (T3) and after that with the modified mixture proposed by the author. In the modified mixture addition of polymer fibres with the dosage of 1 kg/m^3 (T3m) was suggested to avoid spalling. Based on the behaviour of the single-layer wall panel specimens in the fire resistance test, it can be concluded that spalling on the surface exposed to the fire load started at almost the same time in case of both specimens. However, the amount spalling was significantly lower (in terms of the size of the detached surface area and depth also) in case of the specimen with the modified composition than in case of the specimen with the original mixture. During the test of the specimen with original composition, the measured fire resistance was REI 90. The fire resistance of the specimen with modified mixture became REI 120.

4. Conclusions

An extensive experimental analysis laboratory test on small specimens at elevated temperatures as well as large scale fire tests on reinforced concrete elements have been carried out during our research with different compositions of concretes.

Both laboratory test results and also test results with elements indicated the importance of internal structure of concrete such as at elevated temperatures: strength, age of concrete, porosity, type of cement, type of aggregate, type of fibre for delay or avoid considerable reduction of capacity of concrete.

Test **beam** with reference mix (T1) failed in 12 minutes (R0) owing to the complete spalling of concrete cover of the web. Test beam including 1 kg/m^3 polypropylene fibres (T1m) and slag as filling material failed in 70 minutes (R60) in shear (without spalling of concrete cover).

The **TT slab panel** test was first carried out with the original concrete mixture prepared by the manufacturer (T2), and after that with a mixture proposed by us. During the change of the composition, addition of polymer fibres with amount of 1 kg/m^3 (T2m) was suggested to avoid spalling of concrete. During the fire resistance test of the two TT slabs, we found that in both cases (original and modified mixture) insulation criteria was. In both tests, the middle section had the highest increase in temperature, therefore we show the increase of temperature at this point. During the test with the original mixture, the measured fire resistance was REI 60 and the fire resistance of the element with the modified mixture changed to REI 90.

The **wall panel element** test was first carried out with the original composition prepared by the producer (T3) and after that with the modified mixture proposed by the author. In the modified mixture addition of polymer fibres with the dosage of 1 kg/m^3 (T3m) was suggested to avoid spalling. Based on the behaviour of the single-layer wall panel specimens in the fire resistance test, it can be concluded that spalling on the surface exposed to the fire load started at almost the same time in case of both specimens. However, the amount spalling was significantly lower (in terms of the size of the detached surface area and depth also) in case of the specimen with the modified composition than in case of the specimen with the original mixture. During the test of the specimen with original composition, the measured fire resistance was REI 90. The fire resistance of the specimen with modified mixture became REI 120.

Test results all together indicate that modification of concrete compositions resulted very considerable increase of fire resistance.

Acknowledgements

The author of the paper thank for the support of the research received through the project NVKP_16-1-0019 "Materials and Experimental Development of Concrete Products with High Resistance (Chemical Corrosion, Refractory and Antifreeze)".This research was also supported by the János Bolyai Research Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences. SUPPORTED BY THE ÚNKP-19-4 NEW NATIONAL EXCELLENCE PROGRAM OF THE MINISTRY FOR INNOVATION AND TECHNOLOGY.” The research reported in this paper was supported by the Higher Education Excellence Program of the Ministry of Human Capacities in the frame of the Water sciences & Disaster Prevention research area of the Budapest University of Technology and Economics (BME FIKP-VÍZ).

References

Balázs L. Gy., Lublóy É. (2009). Influence of high temperatures on reinforced concrete structures (Vasbetonszerkezetek viselkedése magas hőmérsékleten), Vasbetonépítés, ISSN: 1419-6441 Vol. 11, Issue 4 pp. 113-118.

CEB Bulletin D’Information Number 208 (1991). Fire design of concrete structures.

fib Bulletin 34 (2006). Model code for service life design. Fédération Internationale du Béton (*fib*), Lausanne, Switzerland.

Hertz K.D. (2003). Limits of spalling of fire exposed concrete, Fire Safety Journal, 38,2, 103-116.

Hertz, K.D. (2005). Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, 38, 2, 103-116, ISSN 0379-7112, http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6.

Hinrichsmeyer, K. (1987). Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton *Heft 74 IBMB*, Braunschweig.

Høj, N., P. (2005): Fire Desin of Concrete Stuctures, Proceedings of fib symposium on Keep concrete attractive, (edited by Gy. L. Balázs, A. Borosnyói), 23-25 May 2005 Budapest, pp.: 1097-1105.

Kalifa, P. Chene, G. Galle C. (2001). High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure, Cement & Concrete Composites, 31, 10, 1487-1499.

Kalifa, P. Chene, G. Galle C. (2001): High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure, Cement & Concrete Composites, 31 (10), pp. 1487-1499.

Kalifa, P., Menneteau, F.D., Quenard, D.(2000) Spalling and pore pressure in HPC at high temperature Cement and Concrete Research, 30 (12), pp. 1915-1927.

Khoury, G. A., Grainger, B. N., Sullivan, P. J. E. (1985). Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, Magazine of Concrete Research, 37., 132., 37-48.

Kodur, V.K.R., Wang, T.C., Cheng, F.P. (2004). Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns,Cement & Concrete Composites, 26, 2, 141-153.

Thielen, K. Ch. (1994). Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modelling (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung), *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Schneider, U., Weiß, R. (1997). Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen, Cement and Concrete Research, 11, 22-29.

Waubke, N. V. (1973). Physical analysis of strength reduction of concrete up to 1000 °C, (Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzement−betonen bei Temperaturen bis 1000 °C−Brandverhalten von Bauteilen), Dissertation, TU Braunschweig.

Lublóy Éva, Hlavička Viktor, Kapitány Kristóf

BETON TŰZTERHELÉS UTÁNI SZILÁRDSÁG- ÉS MIKROSZERKEZETI VIZSGÁLATA CT-VEL

Absztrakt

Jelen cikkben csak a beton kémiai átalakulásának hatását vizsgáljuk a beton szilárdsági és belső szövetszerkezeti jellemzőire. Ezekbe beleértendőnek érezzük a melegítés során kialakuló belső szerkezeti átalakulásokat és repedéseket is. A vizsgálatok során 7 darab betonreceptúra nyomószilárdságát, hajlító-húzószilárdságát és testszilárdságát vizsgáltuk a hőmérséklet függvényében. Az alkalmazott hőlépcsők: 20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C voltak. Mivel a pórusrendszer, illetve a repedések száma a hőmérséklet emelkedésének hatására változik és ez jelentősen befolyásolja a szilárdság alakulását, ezért a szilárdsági vizsgálatainkat kiegészítettük CT vizsgálatokkal is. A vizsgálatok során igazoltuk, hogy a CT vizsgáltok egyértelműen alkalmasak a hő (tűz) terhelt betonok vizsgálatára, vagyis a szilárdság csökkenést befolyásoló anyagszerkezeti átalakulások nyomon követésére.

Kulcsszavak: beton, magas hőmérséklet, tűz, anyagszerkezeti változás, CT

EXAMINATION OF CONCRETE STRENGTH AND MICRO-STRUCTURE AFTER FIRE BY COMPUTED TOMOGRAPHY

Abstract

In this study we examine the effect of high temperature on the concrete strength and on the concrete matrix, including chemical changes and the cracks. During the experiments we tested the compression strength, the flexural tensile strength and the body strength of 7 different concrete mixtures after fire load. The applied temperature steps were 20, 50, 150, 300, 400,

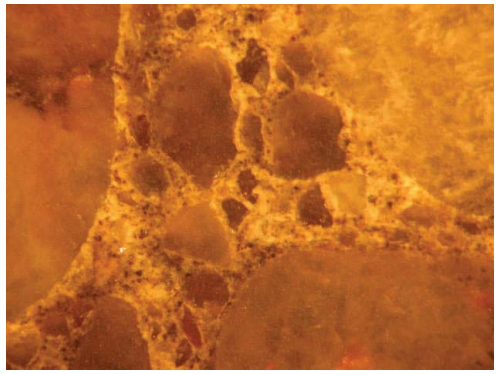
500, 800 ° C. During the fire load the density of the specimens changed, because at high temperatures the porosity of the concrete and the number of the cracks increase. Therefore, our experiments were complemented with computed tomography (CT) tests. During the tests, we proved that CT tests are clearly suitable for monitoring of material structural changes in case of concrete.

Keywords: concrete, high temperature, fire, material structural changes, CT

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

1.1 A Beton viselkedése magas hőmérsékleten

A megszilárdult beton két fő komponensből álló összetett anyag. Az *1. ábraán* kvarckavics adalékanyagú beton metszetről készített optikai mikroszkópos felvételt mutatjuk be. A felvételen jól látható, hogy a megszilárdult beton két fő összetevője az adalékanyag és a cementkő. A beton magas hőmérsékleten való szerkezeti átalakulásával kapcsolatban tudni kell, hogy a hőmérséklet emelkedésnek hatására mindkettőben változások következnek be.



1. ábra: Kvarckavics adalékanyagú beton (20 °C mikroszkópos felvétel)

A hőmérséklet emelkedésével romlanak a beton szilárdsági jellemzői. A beton a lehűlés során sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton

szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete megbomlik, és végezetül tönkremegy.

A beton tűzterhelés hatására bekövetkező tönkremenetele *Kordina* szerint (1997) alapvetően két okra vezethető vissza:

– a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására, illetve

– a betonfelület réteges leválására.

Jelen cikkben csak a beton kémiai átalakulásának hatását vizsgáljuk a szilárdsági és belső szövetszerkezeti jellemzőire, ezért itt elsősorban a beton belső szerkezetében lejátszódó kémiai és fizikai változásokat ismertetjük. Ezekbe beleértendőnek érezzük a melegítés során kialakuló belső mikrorepedéseket is.

A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten a következő paraméterektől függ *(Thielen, 1994):*

– a cement típusától,

– az adalékanyag típusától,

– a víz-cement tényezőtől,

– az adalékanyag-cement tényezőtől,

– a beton kezdeti nedvességtartalmától,

– a hőterhelés módjától.

Magas hőmérséklet hatására a beton szerkezete megváltozik. **100 °C** körül a tömegveszteséget a makro-pórusokból távozó víz okozza. Az ettringit ($3CaOAl_2O_3•3CaSO_4•32H_2O$) bomlása **50 °C és 110 °C** között következik be *(Khoury, Graiver, Sullivan, 1985)*. **200 °C** körül további dehidratációs folyamatok zajlanak, ami a tömegveszteség újabb, kismértékű növekedéséhez vezet. A különböző kiinduló nedvességtartalmú próbatestek tömegvesztesége eltérő lesz egészen addig, amíg a pórusvíz és a kémiailag kötött víz eltávozik. A kiinduló nedvességtartalom függvényében a tömegveszteség eltérése különösen a könnyűbetonok esetén jelentős. A kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség **250-300 °C** között

már nem érzékelhető. **450 °C és 550 °C** között a nem karbonátosodott portlandit bomlása következik be ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O\uparrow$). Ez a folyamat endoterm (hőelnyelő) csúcsot és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz *(Schneider, Weiss, 1977),* ez a kémiai átalakulás a betonszilárdság csökkenéséhez, illetve az acélbetétek tapadásának jelenetős csökkenéséhez vezet. A közönséges betonok esetén a kvarc α –ból β módosulatba való átkristályosodása **573 °C**-on okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc átalakulása 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár *(Waubke, 1973),* ami a beton lényeges károsodását eredményezi, ezen hőmérséklet felett az adalékanyag határfelületén feltehetőleg mikrorepedések jelennek meg. A régi szakirodalom szerint ezen hőmérséklet fölött a beton nem rendelkezik jelentős teherbírással. **700 °C**-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat-növekedéssel és további szilárdságcsökkenéssel jár *(Hinrichsmeyer, 1987).*

A CT (komputer tomográfiás felvételeken) a sűrűség különbségeket látjuk, ebből kifolyólag a pórusrendszer változását egyértelműen felismerhető a felvételeken, ezért a bemutatjuk a beton pórusrendszerének a változását hőterhelés hatására. A kvarckavics adalékanyagú betonoknál **150 °C-ig** a cementkő porozitása, valamint az adalékanyag és a cementkő közötti kontaktzóna porozitása nő. A kontaktzónában **150 °C-ig** repedések keletkezhetnek, amit az adalékanyag és cementkő különböző hőtágulásával magyarázhatunk. A cementkő struktúrája **450 °C-ig** stabil, de mikrorepedések már ezen hőmérséklet alatt is keletkezhetnek. **450-550 °C** között azonban a portlandit bomlása miatt a porozitás megnő. Ezt követően **650 °C-ig** a cementkő felépítése nem változik. **650 °C** felett a CSH vegyületek bomlása megkezdődik, és a kapillárisok száma megnő. **750 °C** felett a pórusok átmérője nagymértékben növekszik. A különböző mikrorepedések mérete függ az adalékanyag legnagyobb szemnagyságától *(Hinrichsmeyer, 1987).*

1.2 A CT vizsgálat rövid leírása és alkalmazhatósága tűzkárosult beton esetén

Tekintettel arra, hogy a pórusrendszer a hőmérséklet emelkedésének hatására változik ezért a CT vizsgálatok alkalmasak lehetnek a hő (tűz) terhelt betonok vizsgálatára. Az alábbiakban a CT vizsgálatok menetét ismertetjük röviden. A hagyományos röntgen vizsgálatnál a testből kilépő sugárzás a filmen feketedésként jelenik meg. Minél kisebb az anyag sugárgyengítési

együtthatója, annál nagyobb sugárzás éri a filmet, így sötétebb lesz a film. A nagyobb sugárgyengítési együtthatójú anyagok esetén kisebb a testből kilépő sugárzás, ami a filmen világosabb területként jelenik meg. A komputertomográfiás (CT) felvételeken a vizsgálat tárgya szeletekre bontva látható. A CT adatmátrixból vizualizált kép első közelítésben úgy kezelhető, mint egy szeletfelbontásnak megfelelő sűrűségtérkép az adott anyagokról. Ezen a sűrűség képen jól kirajzolódnak a vizsgált tárgy különböző sajátosságai (adalékanyag szemcsék, pórusok, repedések).

A CT felvételek esetén azonban nagy hangsúlyt kell fektetni, azoknak a korrekt, mérnökök számára is használható kiértékelésére.

2. VIZSGÁLAT MÓDSZERE

2.1 Alkalmazott anyagok

A vizsgálathoz receptenként 21 darab 150 mm élhosszúságú kockát és 21 darab 70x70x250 mm-es hasábot készítettünk. A T1 és T2 összetétel zúzottkő adalékanyaggal, a T3-T7 betonreceptek kvarckavics adalékanyaggal készültek.

A kísérletek során minden recept CT vizsgálatát is elvégeztük a hőterhelt , majd eltört hasábok egyik felén.

2.2 Tűzvizsgálat és a szilárdságmérés menete

A kísérleteink során a szabványos (standard), vagyis a magasépítési szerkezetekre, és a csarnokokra alkalmazható tűzgörbéhez közeli felfűtési görbét alkalmaztunk

A próbatesteket a kizsaluzás után 7 napig vízben, majd a hőterhelésig (28 napos korig) laboratóriumi körülmények között tároltuk.

A nyomó szilárdság vizsgálatot 150x150x150 mm élhosszúságú már hőterhelt és laborlevegőn lehűlt próbakockákat ALPHA 3-3000 S típusú törőgépen törtük el. A törőgép terhelési sebessége 11,25 kN/s volt

A hajlító-húzó szilárdság meghatározásához a 250x70x70 mm-es hasáb próbatesteket központos hajlító vizsgálatnak vetettük alá. Majd a fél hasábok elnyomásával a testszilárdságot is megállapítottuk. A hasábokat is a hőterhelést követően laborlevegőn lehűlt állapotban terheltük.

A vizsgálatok során a különböző betonreceptúrák nyomószilárdságát, hajlító-húzószilárdságát és testszilárdságát vizsgáltuk a hőmérséklet függvényében. Az alkalmazott hőlépcsők: 20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C voltak.

2.3 CT mérés menete

A CT méréseket a Pécsi Egyetem Diagnosztikai és Onkoradilógia Intézetében végeztük el. A CT felvételek feldolgozása és elemzése *Matlab* környezetben írt algoritmusokkal, automatikus módon, előre beállított paraméterekkel történik. Az adalékanyagok, kötőanyagok és a pórusok szegmentálása küszöböléssel (thresholding) történt, de a CT felvételek zajossága miatt az algoritmusban képfeljavító eszközöket is alkalmaztunk. Ezek közé különböző szűrők (például átlagoló szűrő) tartoztak, valamint külön foglalkoznunk kellett a CT-re jellemző nyalábkeményedési korrekcióval is. Utóbbi a homogén anyagon áthaladó röntgensugár gyengülését hivatott korrigálni. A kialakított algoritmusok egyenként elvégzik a CT felvételeken a szegmentálást, majd elemzés után szeletenkénti térfogat százalékos statisztikákat állítanak elő. Az eredményeket táblázatos formában is rögzíthetjük, és további statisztikai számításokra is felhasználhatjuk, nem csupán szeletenként, hanem a teljes mintára vonatkozóan is. Az előállított eredmények közé nem csupán a kinyert statisztikák tartoznak, hanem a köztes lépésekben előállított szegmentált felvételek is, melyek alkalmasak a mintán belüli különböző komponensek vizualizálására.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1 Szilárdságvizsgálat eredményei

3.1.1 Nyomószilárdság vizsgálat eredményei

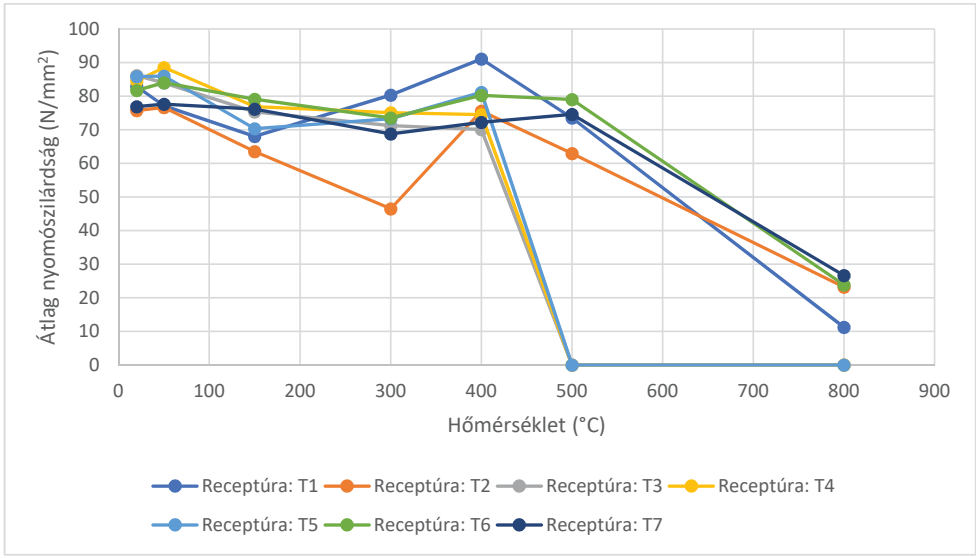
Nyomószilárdságot 150x150x150 mm élhosszúságú kockákon mértünk. A mért és a relatív nyomószilárdsági eredményeit a hőmérséklet függvényében a *3. és 4. ábra* szemlélteti.

A nyomó szilárdság alakulása minden keverék esetén hasonló volt: A betonszilárdság kezdeti csökkenése után egy átmeneti növekedést tapasztalhatunk, amit utána újabb szilárdságcsökkenés követett.

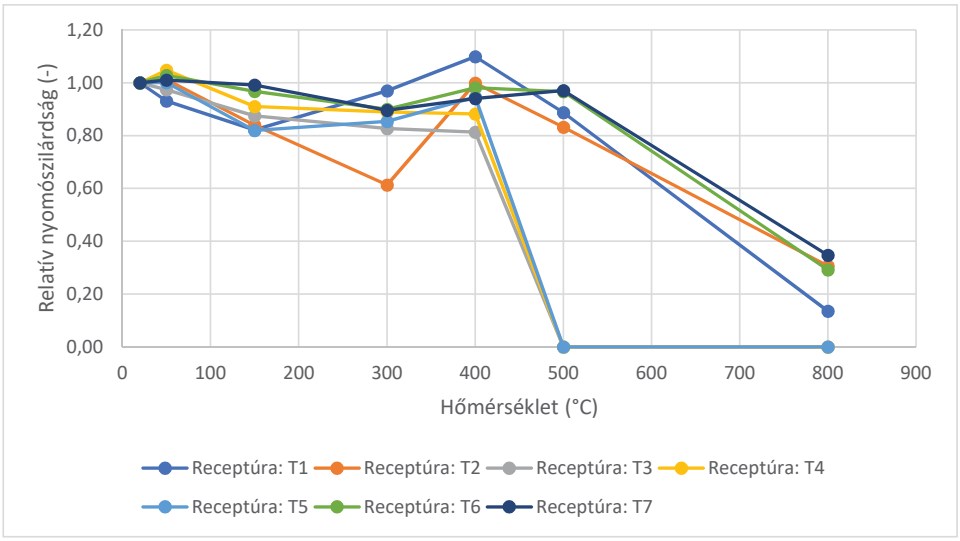
A következő eltéréseket azonban kiemelnénk:

- A lokális minimum pont helye változik, pl. a T2 recept esetén a szokásos 150 °C helyett 300 °C-nál található.

- A T3, T4 és T5 beton összetételek estén az 500 °C-os hőterhelés hatására a beton próbatestek a kemencében felrobbantak, ezért innentől szilárdságot 0-ra vettük fel. Ez arra utal, hogy a nagyelemes kísérletek során a betonfelület robbanásszerű leválásának az esélye elég nagy, tehát ezeknek a betonösszetételeknek az alkalmazása kérdéses.



3. ábra: Kockán mért átlag nyomószilárdság a hőmérséklet függvényében

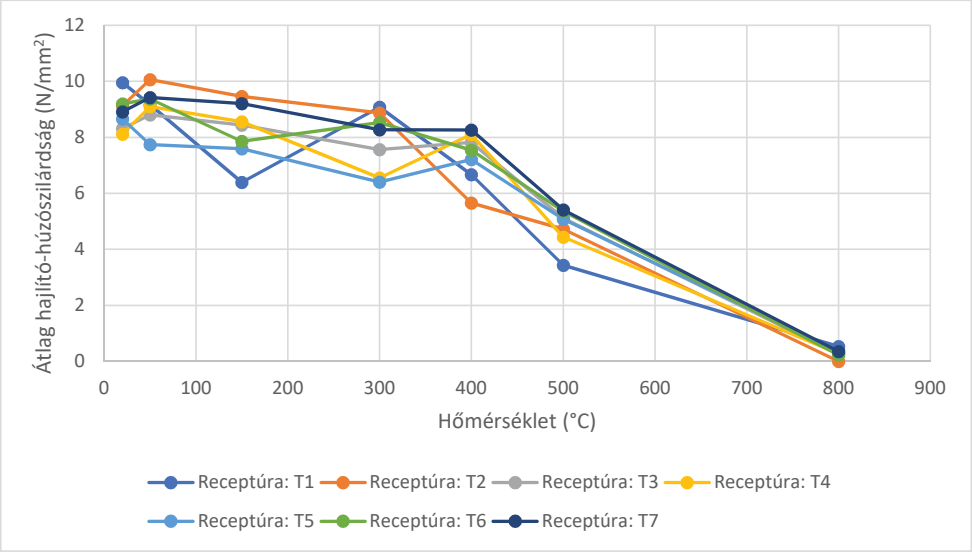


4. ábra: Kockán mért relatív nyomószilárdság a hőmérséklet függvényében

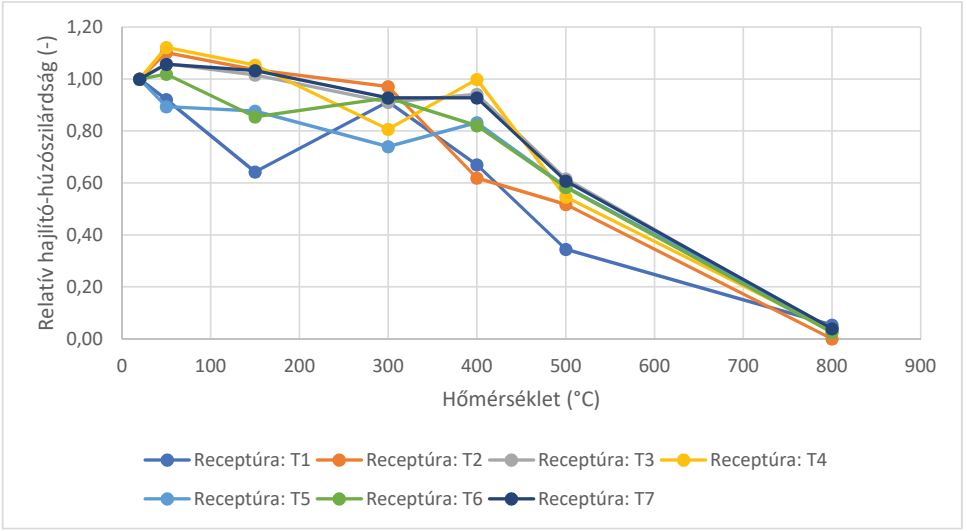
3.1.2 Hajlító-húzószilárdság vizsgálat eredményei

Hajlító-húzószilárdságot 70x70x250 mm élhosszúságú hasábokon mértünk. A vizsgált receptúrák mért és a relatív hajlító-húzószilárdsági eredményeit a hőmérséklet függvényében a *5. és 6. ábra* szemlélteti.

A hajlító-húzószilárdság alakulása minden keverék esetén hasonló volt: A hajlító-húzószilárdság csökkenése egyenletesnek mondható, minden keverék esetén.



5. ábra: Hasábon mért átlag hajlító-húzószilárdság a hőmérséklet függvényében

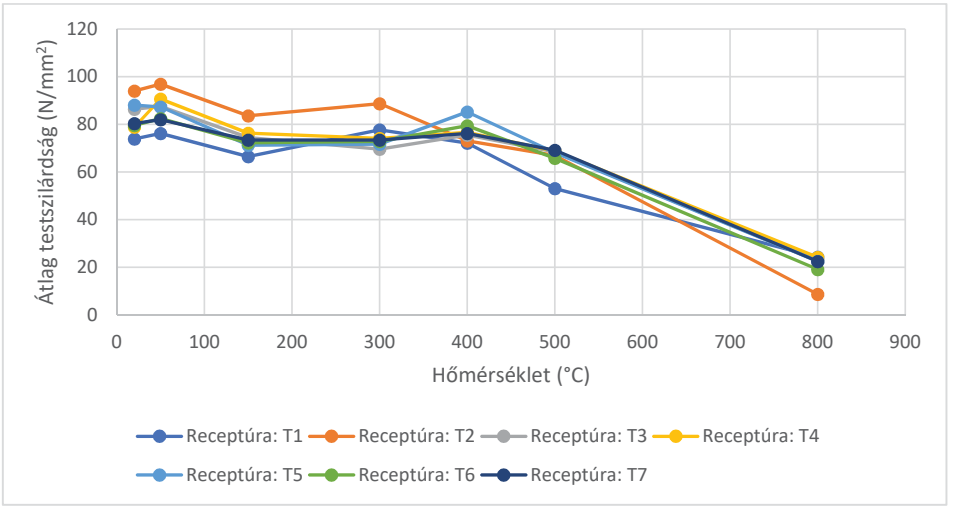


6.ábra: Hasában mért relatív hajlító-húzószilárdság a hőmérséklet függvényében

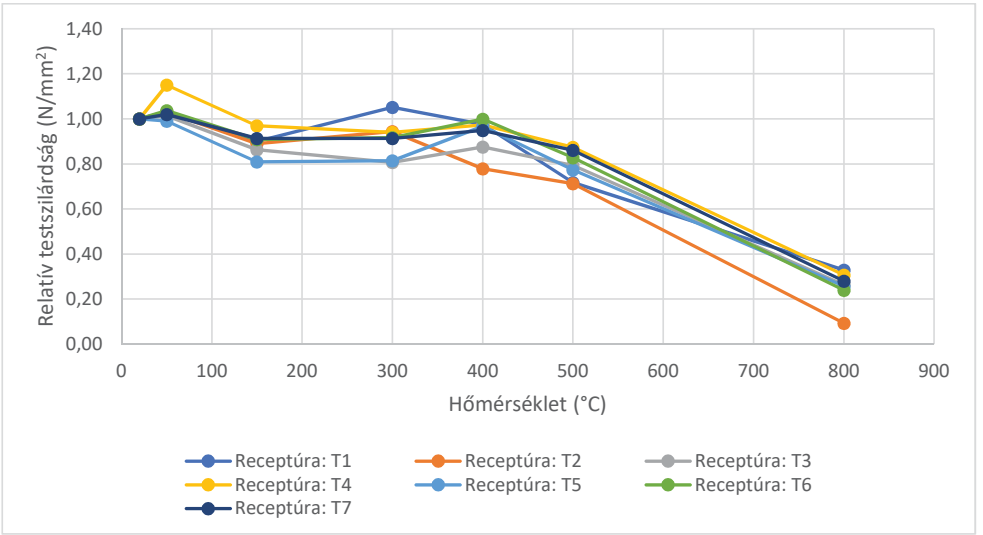
3.1.3 Testszilárdság eredmények

A betonok testszilárdságát az elhajlított hasábok egyben maradt fél hasábjain mértük 70x70 mm területű nyomólapok segítségével. A kiindulási receptúrák mért és a relatív testszilárdsági eredményeit a hőmérséklet függvényében a *7. és 8. ábra* szemlélteti.

A testszilárdság alakulása minden keveréknél azonos tendenciát mutat: A görbék között lényeges eltérés nem tapasztalható.



7. ábra: Hasában mért átlag testszilárdság a hőmérséklet függvényében

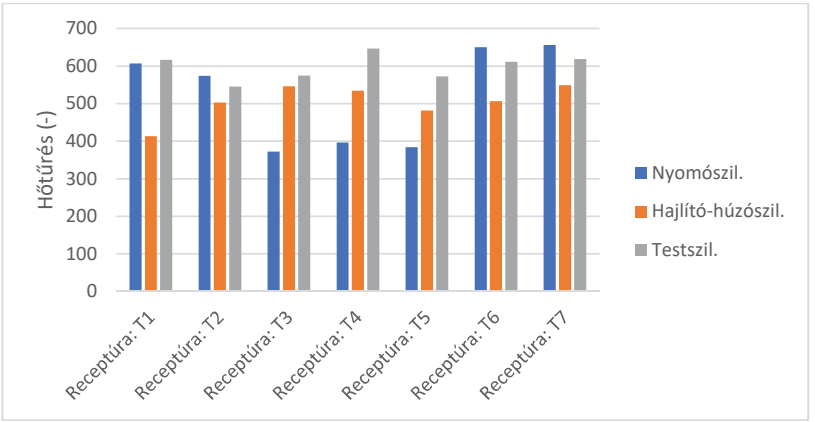


8. ábra: Hasában mért relatív testszilárdság a hőmérséklet függvényében

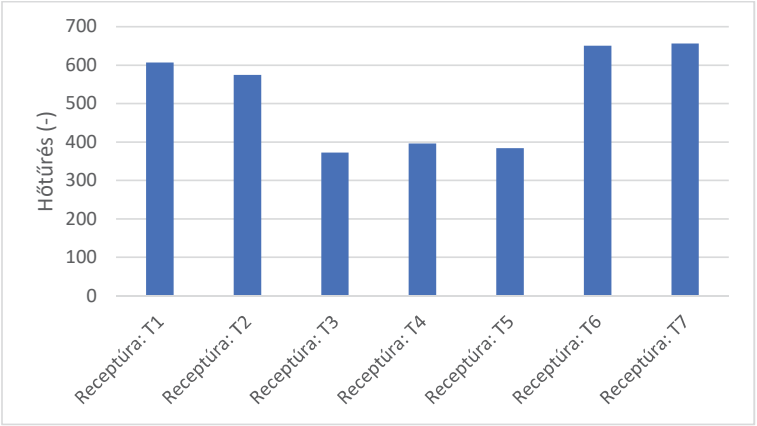
3.1.4 Hőtűrési eredmények

A betonok hőmérséklet következtében bekövetkező szilárdságcsökkenését a könnyebb átláthatóság és összehasonlíthatóság miatt gyakran a betonok hőtűrésével jellemzik. A betonok hőtűrése a relatív szilárdság-hőmérséklet görbe alatti terület kifejezve egyetlen értékben.

A vizsgált receptúrák hőtűrését a *9. ábra* szemlélteti. A *10. ábrán* a nyomószilárdságból számolt hőtűrés értéket adjuk meg. Jól látszik, hogy a nyomószilárdság szempontjából a T3, T4 és T5 betonok hőtűrése a legkisebb, amit a beton kockák felrobbanásával magyarázhatunk. A T6 és T7 betonok hőtűrése a legmagasabb a T1 és T2 betonok alacsonyabb hőtűrését az eltérő adalékanyag magyarázhatja.



9. ábra: A relatív szilárdsági adatokból számított hőtűrés a receptúrák függvényében



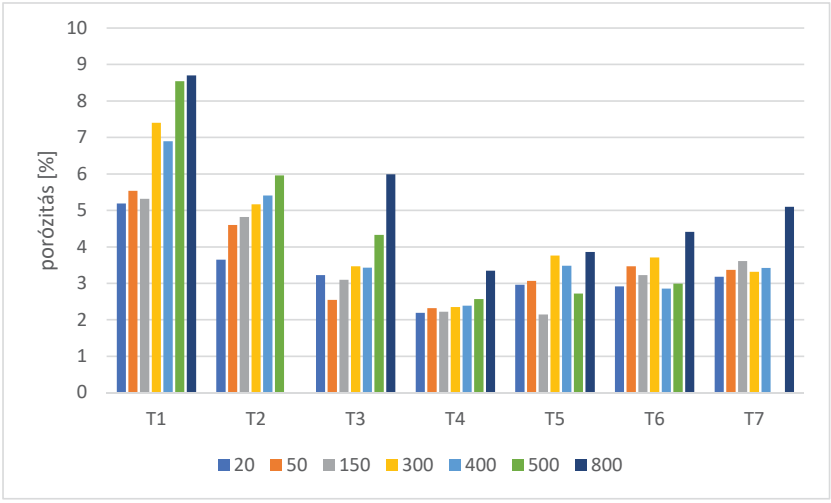
10. ábra: A relatív nyomószilárdsági adatokból számított hőtűrés a receptúrák függvényében

3.2 CT vizsgálat eredményei

A T1-T7 receptekből készült betonokon CT vizsgálatokat is végeztünk. A CT mérés előtt a próbatesteket hőterheltük (20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C), majd a hőterhelés után kihűlt állapotban végeztük el a méréseket. A CT vizsgálat segítségével az egyes próbatestek porozitását meghatároztuk a hőmérséklet függvényében. A *11. ábrán* a porozitás alakulását adjuk meg a hőmérséklet függvényében. Jól látható, hogy a hőmérséklet emelkedésének hatására a porozitás minden recept esetén növekvő tendenciát mutat, a diagramm alapján megállapíthatjuk, hogy a CT vizsgálatok alapján következtetni lehet a hőterhelés nagyságára, vagyis a károsodás mértékére.

A T1 és T2 minták esetén (zúzott kő adalékanyaggal készült betonok) a porozitás emelkedés a hőterhelés hatására itt is megfigyelhető. A zúzott kő adalékanyaggal készült betonok esetén a legmagasabb porozitás értékeket 800 °C-on határoztunk meg, ezen hőterhelés felett a porozitás értéke csak kis mértékben nőtt, ami a kvarckavics adalékanyagú betonokra nem igaz. Az eltérést az magyarázhatja, hogy 500 °C felett a kvarckavics adalékanyagú betonok esetén az adalékanyag határfelületén repedések keletkeztek a zúzott kő adalékanyagú betonok esetén nem. Ezt az adalékanyag eltérő hőtágulásával, illetve az adalékanyag eltérő felületével magyarázhatunk. Másik magyarázat lehet, hogy a kvarckavics felülete sima a zúzott kő felülete

érdes, tehát máshogy tapad, rá a cementkő és ezáltal eltérő hőérzékenységű határfelület alakulhat ki.



11. ábra: Az alapreceptek betonjának a porozitás változása a hőmérséklet függvényében

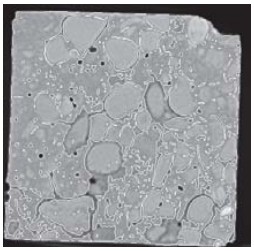
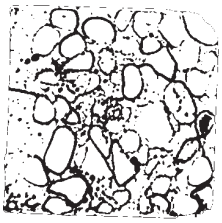
A CT vizsgálatok képi elemzése során a következő megállapításokra jutottunk *(12. ábra):*

- a T3-T7 minták esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, a cementkő elvált az adalékanyagtól,

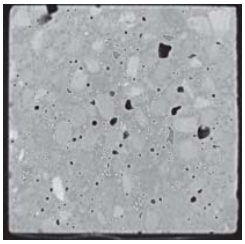
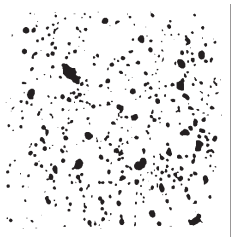
- a T1 és T2 minta esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, de a cementkő határozott elválását az adalékanyagtól nem figyeltük meg, vagyis a határfelület károsodásának mértéke kisebb volt a zúzott adalékanyagú betonok esetén

- az 500 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete károsodott, a cement kő és az adalékanyag felületén repedések keletkeztek,

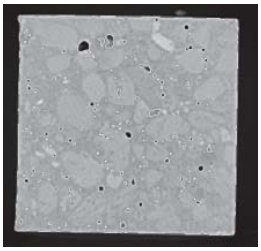
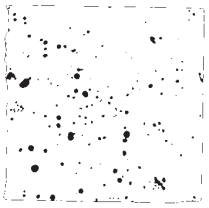
- 150 °C felett az adalékanyagok jobban szegmentálhatók, mint az alatt, ami azt jelenti, hogy ezen hőmérséklet felett a cementkő sűrűsége elkezd csökkeni.

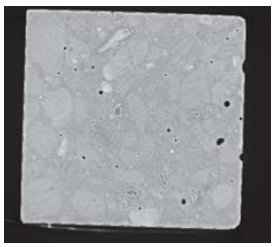
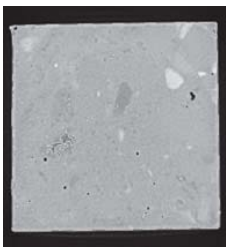
T 3 minta 800 °C hőterhelés után

T 1 minta 800 °C hőterhelés után

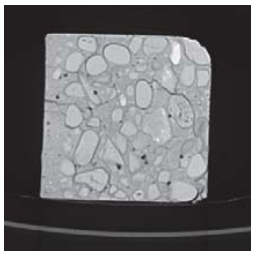



T 1 minta 500 °C hőterhelés után

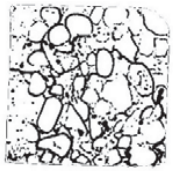



150 °C hőterhelés után 20 °C után

12. ábra: A CT felvételek képi kiértékelése



EREDETI

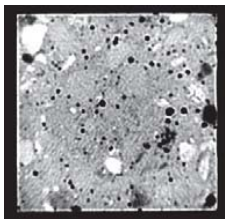


SZEGMENTÁLT PÓRUSOK

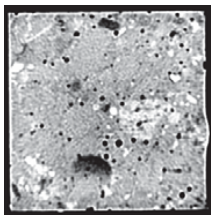
T 3 minta 800 °C hőterhelés után (azonos szeletek)

3.3 T3 recept alapján készült beton részletes elemzése

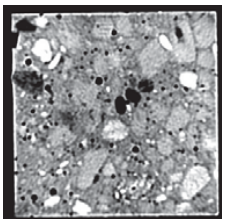
A *13. ábra* a hőterhelt próbatestekről készült CT felvételeket foglalja össze. A hőterhelés függvényében változik a próbatestekben a porozitás. Jól látható, hogy a 150, a 300 és a 400 °C-on hőterhelt próbatestek esetén megnőtt a porozitás. A 150 °C feletti hőterhelésnek kitett próbatestek esetén, a cementkő sűrűsége is megváltozott, ezek a felvételek sokkal sötétebbek, ami arra utal, hogy kisebb sűrűségű a benne lévő cementkő.



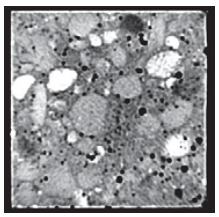
20 °C



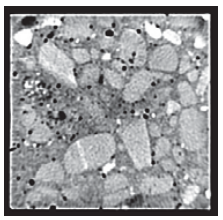
50 °C



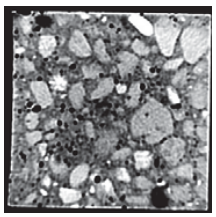
150 °C



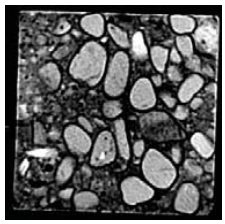
300 °C



400 °C



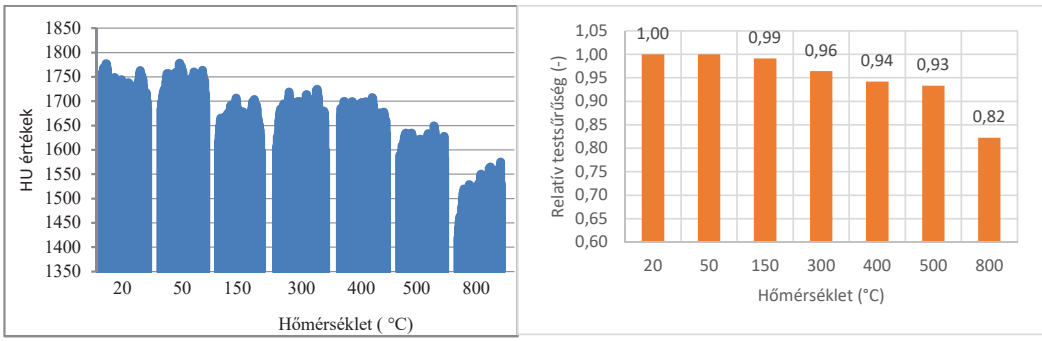
500 °C



800

13. ábra: A különböző hőmérsékleten hőterhelt próbatestekről készült felvételek

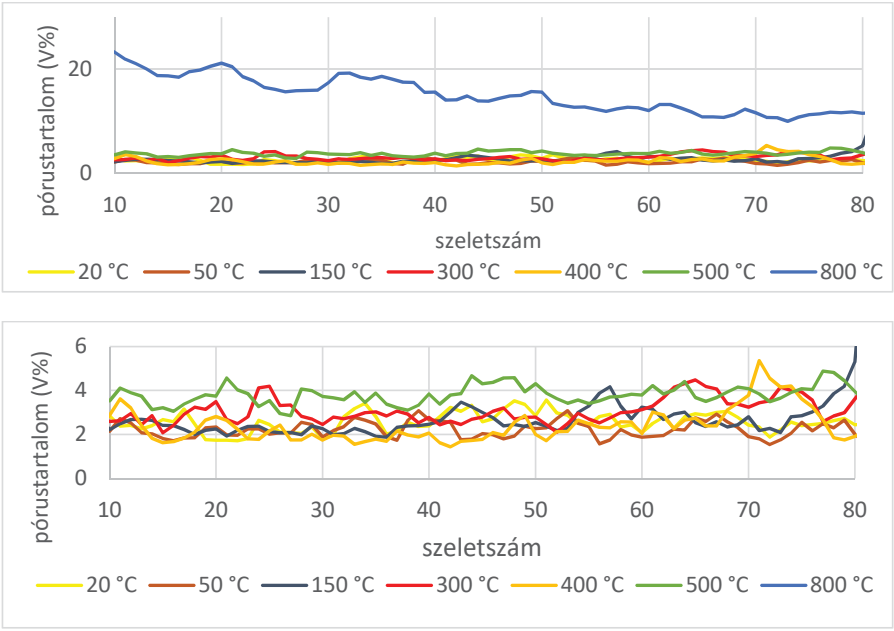
A *14. ábrán* a HU-értékek és a testsűrűség alakulását adjuk meg a hőmérséklet függvényében. Jól látható, hogy a két diagram tendenciája megegyezik, tehát a HU-értékek és a testsűrűség értékek között egyértelmű összefüggés írható fel. A testűrűség a hőterhelés hatására változik, ezért a HU- értékek és a testsűrűség alapján megállapítható a hőterhelés hőmérséklete.



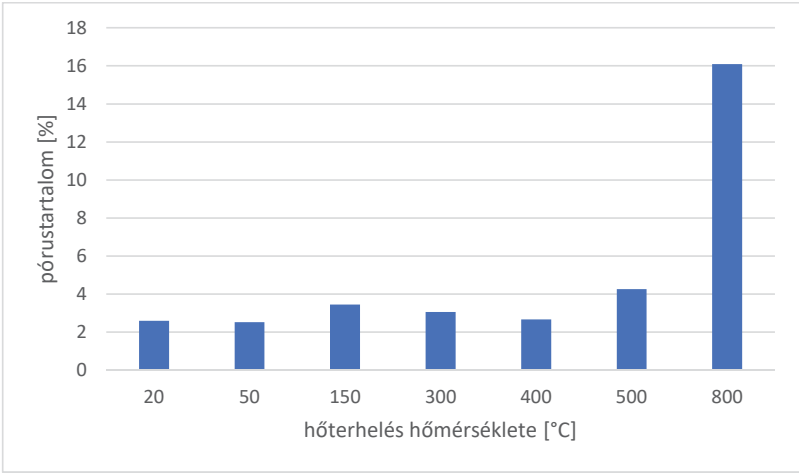
14. *ábra: A HU-értékek és a testsűrűség alakulása a hőmérséklet függvényében*

A *15. ábrán* a póruseloszlást láthatjuk a próbatestek hossztengelye mentén ábrázolva a hőmérséklet függvényében. Az ábrán jól látható, hogy 800 °C-on jelentős mértékben 500 °C-on kis mértékben növekedett meg a porozitás. Ennek magyarázata lehet a betonban kialakuló repedések és szerkezeti átalakulások lehetnek. Ezek alapján megállapítható, hogy 500 °C felett a CT mérés alkalmazható a hőterhelés hőmérsékletének megállapítására.

A *16. ábrán* az átlagos póruseloszlást adjuk meg a hőmérséklet függvényében. Megfigyelhető, hogy 300 °C, 500 °C-os hőterhelést követően a porozitás kis mértekben nő, a 800 °C-os hőterhelés követően pedig jelentős növekedést figyelhetünk meg.



15. ábra: A pórustartalom eloszlás a hossztengely mentén



16. ábra: Az átlagos pórustartalom értékek a hőmérséklet függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok során az 7 különböző beton nyomószilárdságát, hajlító-húzószilárdságát és testszilárdságát vizsgáltuk a hőmérséklet függvényében. Az alkalmazott hőlépcsők: 20, 50, 150, 300, 400, 500, 800 °C voltak. Tekintettel arra, hogy a pórusrendszer, illetve a repedések száma a hőmérséklet emelkedésének hatására változik ezért a szilárdság vizsgálatainkat kiegészítjük a CT vizsgálatokkal is.

A nyomószilárdság szempontjából a T3, T4 és T5 betonok hőtűrése a legkisebb, amit a beton kockák felrobbanásával magyarázhatunk. A T6 és T7 betonok hőtűrése a legmagasabb a T1 és T2 betonok alacsonyabb hőtűrését az eltérő adalékanyag magyarázhatja.

A CT vizsgálatok képi elemzése során a következő megállapításokra jutottunk:

- a T3-T7 minták esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, a cementkő elvált az adalékanyagtól,

- a T1 és T2 minta esetén 800 °C hőterhelés után az adalékanyag határfelülete jelentősen károsodott, de a cementkő határozott elválását az adalékanyagtól nem figyeltük meg, vagyis a határfelület károsodásának mértéke kisebb volt a zúzott adalékanyagú betonok esetén,

- a hőmérséklet növekedésével a mintákon egyre szembetűnőbb a kontraszt változás: az adalékanyagok jobban elhatárolhatók, hiszen az azokat körülvevő cementkő a távozó víz, és a kiégő anyagok következtében ritkulni fog, a sűrűségkülönbségek markánsabbak lesznek.

- az átlagos póruseloszlás tekintetében megállapítható, hogy 300 °C, 500 °C-os hőterhelést követően a porozitás kis mértekben nő, a 800 °C-os hőterhelés követően pedig jelentős növekedést tapasztalható.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenálló képességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

A kutatás Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült”

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Bólyai János Ösztöndíjon keresztül kapott támogatásáért.

6. HIVATKOZÁSOK

Balázs L. Gy., Lublóy É., Földes T. (2015) Let’s look at inside by x-ray computed tomograph (CT), *Stuctural Conctere Journal* (submitted)

Balázs L. György, Lublóy Éva: Possibilities of computed tomography (CT) for diagnosis of concrete structures In: D Choi, T Tang (szerk.) 6th Int Conference of Asian Concrete Federation, 2014, pp. 34-37.

Éva Lublóy, Balázs L. György: Potencials in use of X-ray computer tomograph (CT) to study concrete, CONCRETE BETON-TECHNOLOGIE KONSTRUKCE SANACE 6, 2013, pp. 43-45.

Hinrichsmeyer, K. (1987): Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig

Khoury, G. A., et al. (2001): Fire Desgin of Concrete Materials Structures and Modelling, Proceeding of 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001

Khoury, G. A., Grainger, B. N, Sullivan P. J. E (1985): Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, Magazine of Concrete Research, Vol 37, No. 132

Kordina, K (1997): Über das Brandverhalten punktgestützter Stahbetonbalken, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Lublóy Éva, Balázs L György, Kapitány Kristóf, Barsi Árpád, Földes Tamás: Tűzkárosodott vasbetonszerkezet vizsgálhatósága CT-vel, VASBETONÉPÍTÉS 16:(4), 2014, pp. 86-90

Thielen, K. Ch. (1994): Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Waubke, N. V. (1973): Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C-Brandverhalten von Bauteilen, Dissertation, TU Braunschweig

Dr. Lublóy Éva PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

lubloy.eva@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-9628-1318

Hlavička Viktor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

hlavicka.viktor@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-5435-4400

Dr. Kapitány Kristóf, PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Photogrammetry and Geoinformatics, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

kapitany.kristof@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0003-4052-6317

Lublóy Éva Eszter

HOGYAN BEFOLYÁSOLJA A BETONSZILÁRDSÁG A TŰZÁLLÓSÁGI HATÁRÉRTÉKET?

Absztrakt

Elsőre ellentmondásosnak tűnhet, hogy a nagyobb betonszilárdság ronthat az épületszerkezetek tűzállóságán. Azonban, amennyiben a beton szilárdsága túllép egy felső korlátot, akkor a betonfelületek leválásának valószínűsége növekszik.

Az előregyártás során gyakran előfordul, hogy a tervezettnél nagyobb szilárdsággal készülnek el a szerkezeti elemek. A nagyobb betonszilárdság általában nem okoz teherbírás csökkenés, de a tűzteherre való méretezés esetében komoly problémát jelenthet

A kutatás során két előregyártott elemet: egy TT panelt és egy egyrétegű falpanelelemet vizsgáltunk. A vizsgálat során egy-egy etalon elemet (jelenleg gyártásban lévő elemet) és egy-egy módosított betonösszetétellel készített elemet hasonlítottunk össze. A módosításban a beton réteges leválásának megelőzésére műanyagszálak adagolással vizsgáltuk a szerkezeteket. Kísérleteink eredményeképp a szabványok szigorítását javasoljuk. Kísérletileg igazoltuk, hogy a vasbeton szerkezeteink tűzbiztonsága érdekében már alacsonyabb betonszilárdsági osztályban is elő kell írni a műanyag szálak adagolását, valamint a szerkezetek minősítése során tűzbiztonság szempontjából a felső szilárdsági korlát bevezetése indokolt.

Kulcsszavak: beton, réteges leválás, tűzvizsgálat, tűzállósági határérték

HOW DOES CONCRETE STRENGTH AFFECT FIRE RESISTANCE?

Abstract

At first, it may seem contradictory that higher concrete strengths can degrade fire resistance of building structures. However, if the strength of the concrete exceeds an upper limit, the probability of concrete surfaces becoming detached increases.

During prefabrication, structural elements are often produced with greater strength than planned. Higher concrete strengths generally do not cause a decrease in load-bearing capacity, but can be a serious problem when sizing for fire load.

During the research, two prefabricated elements were tested: a TT panel and a single-wall panel. During the test, a reference element (currently in production) and a component made with a modified concrete composition were compared. In the modification, structures were tested by adding plastic fibers to prevent the layering of concrete. As a result of our experiments, we recommend making stricters standards. It has been proven that in order to ensure the fire safety of reinforced concrete structures, it is necessary to require the addition of plastic fibers even in the lower concrete strength class and to introduce an upper strength limit from the aspect of fire safety.

Keywords: concrete, layered peeling, fire test, fire resistance limit

1. BEVEZETÉS

A beton tűzterhelés hatására bekövetkező tönkremenetele Kordina [1] szerint alapvetően két okra vezethető vissza:

– a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására, illetve
– a betonfelület réteges leválására.

1.1 A betonban lejátszódó kémiai átalakulás

A cementkőben és a betonban hőmérsékletváltozás hatására lejátszódó kémiai folyamatok alakulását termoanalitikai módszerekkel (TG/DTG/DTA) vizsgálható. A TG (termogravimetriás) és a DTG (derivált termogravimetriás) görbék segítségével a tömegváltozással járó átalakulások mennyiségi elemzése lehetséges. A DTA (differenciál termoanalízis) görbékkel nyomon követhető a mintákban a hőmérséklet növekedésének hatására bekövetkező exoterm (hőtermelő) vagy endoterm (hőelnyelő) folyamatok alakulása.

100°C körül a tömegveszteséget a makro-pórusokból távozó víz okozza. Az ettringit ($3CaOAl_2O_3•3CaSO_4•32H_2O$) bomlása **50 °C és 110 °C** között következik be [2]. 200°C körül további dehidratációs folyamatok zajlanak, ami a tömegveszteség újabb, kismértékű növekedéséhez vezet. A különböző kiinduló nedvességtartalmú próbatestek tömegvesztesége eltérő lesz egészen addig, amíg a pórusvíz és a kémiailag kötött víz eltávozik. A kiinduló nedvességtartalom függvényében a tömegveszteség eltérése különösen a könnyűbetonok esetén jelentős. A kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség **250-300 °C** között már nem érzékelhető.

450 °C és 550 °C között a nem karbonátosodott portlandit bomlása következik be ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O\uparrow$). Ez a folyamat endoterm (hőelnyelő) csúcsot és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz [3].

A közönséges betonok esetén a kvarc α –ból β módosulatba való átkristályosodása **573 °C**-on okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc átalakulása 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár [4], ami a beton lényeges károsodását eredményezi. Ezen hőmérséklet fölött a beton nem rendelkezik jelentős teherbírással.

700°C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat-növekedéssel és további szilárdságcsökkenéssel jár [5].

A beton kémiai, illetve fizikai szerkezetváltozásának hatására a beton szilárdsági jellemzői is megváltoznak.

1.2 A beton felület réteges leválása

A szakirodalom szerint a betonfelület leválásnak számos oka lehet, jellemzően [6-9] a következőkre vezethető vissza:

- víz távozása,
- kvarc kavics hőtágulása,
- az adalékanyag leválása,
- alacsony húzószilárdság,
- sűrű vasalás,
- gyors felfűtés,
- aszimmetrikus átmelegedés,
- vékony keresztmetszeti részek,
- változó vastagságú keresztmetszeti részek,
- befogott tartóvégek,
- hőterhelésből eredő feszültségek.
- sarkok és lekerekített tartórészek,
- feszített tartók, nyomott részek,
- szabad víz a betonban,
- alacsony áteresztőképesség,
- a zárt pórusokban víz.

Az utóbbi időkben a betontechnológia fejlődésével sokkal tömörebb beton struktúrát hozunk létre (pl. nagyszilárdságú és öntömörödő betonok). Számos kutató foglakozott a nagyszilárdságú betonok tűz alatti viselkedésével. *Hertz* [6] szerint a nagyszilárdságú betonok mellett még a nagy tömörségű betonok is veszélyesek a betonfelület robbanásszerű leválása szempontjából pl. a szilikapor tartalmú betonok. Hertz kísérletei alapján megállapított, hogy számos esetben a lehűlés során következik be a betonfelület leválása. A betonfelület leválása szempontjából a kritikus léghőmérséklet 374 °C. Megállapították, hogy 3-4% nedvességtartalom alatt a betonfelület leválásnak az esélye nagyon kicsi.

A nagyszilárdságú betonok felületének leválását általában a hőmérséklet emelkedésének hatására bekövetkező feszültségek okozzák; hagyományos beton esetén általában a betonból távozó vízgőz feszíti le a felületi rétegeket.

A betonfelület réteges leválásának az esélyét a következő tényezők befolyásolják [6]:

- külső tényezők: a tűz jellege, a szerkezetre ható külső terhek nagysága;
- geometriai jellemzők: a szerkezet geometriai adatai, a betonfedés nagysága, a vasbetétek száma és elhelyezkedése;
- a beton összetétele: az adalékanyag mérete és típusa, a cement és a kiegészítő anyag típusa, a pórusok száma, a polipropilén száladagolás, az acél szálerősítés, a beton nedvességtartalma, áteresztőképessége és szilárdsága.

A beton permeabilitása jelentősen befolyásolja a tűz által kiváltott tényezőket, alacsony áteresztőképességük miatt a HSC beton magasabb áthajlási szinteket tapasztal, mint az NSC gerendák, ahol magas a permeabilitása [7].

Vasbetonszerkezetek esetén fontos, hogy a betonfelületek réteges leválása tűz esetén lehetőség szerint ne következzen be, hiszen a leválás problémát jelent a tűzállóság és a teherbírás szempontjából, továbbá nehezíti a mentési munkákat. A betonfelület leválásának hatására a szerkezet teherbírásvesztése jóval korábban bekövetkezik, mivel az acélbetétek védelme megszűnik, és ezáltal sokkal gyorsabban átmelegszik, ami a húzási teherbírás nagyon gyors kimerüléséhez vezet.

Számos kísérlet igazolta, hogy a betonfelület leválásának veszélye műanyagszálak alkalmazása esetén lényegesen kisebb, mivel a szálváz kiégése során létrejövő *pórusszerkezet* a szétrepedés veszélyét csökkenti [10-12].

Számos kísérletet végeztek nagy elemeken elsősorban hidrocarbaon, vagyis alagutaknál bekövetkező tűzterhelés esetén. *Mörth, Haberland, Horvath és Mayer* [13] alagútelemekkel (hosszúság 11 m, magasság 2 m) végzett kísérletei igazolták, hogy a polipropilén szálakkal erősített betonok felületének réteges leválása a tűz hatására (1200°C-os hőterhelés esetén) nem következett be.

Hasonló eredményre jutott Ausztriában egy másik kutatócsoport is [14], amely nyomott lemezeket vizsgált. A hagyományos betonnál kétórás tűzterhelés hatására következett be a betonfelület réteges leválása, a polipropilén száladagolással készített lemez esetében viszont ez nem volt észlelhető.

Az MSZ EN 1992-1-2 [15] szabvány a nagyszilárdságú betonokra (HSC) vonatkozó kiegészítő szabályokat adja meg, melyek a következők:

- A szerkezeti elemek méretezésekor a beton tulajdonságait és a betonfelületek leválásának az esélyét figyelemben kell venni.
- A szilárdsági értékeket három osztályban adják meg, a betonfelületek leválásra két osztály van definiálva. Az ajánlott szilárdsági osztályok C55/67 és C60/75 az 1. osztály, C70/85 és C80/95 a 2. osztály és C90/100 a 3. osztály.
- Ha a beton nagyszilárdságú, akkor speciális méretezési módszereket kell alkalmazni, a szilárdságcsökkentést a nagyszilárdságú betonoknak megfelelően kell elvégezni.
- C80/90-C90/105 nyomószilárdsági (1 és 2 osztály) osztályok között a tűzhatásnak közvetlenül kitett beton esetén a betonfelületek robbanásszerű leválása bekövetkezhet. *Ennek elkerülése végett a következő módszerek szerint kell eljárni:*

  - A módszer: Vasháló minimum 15 mm nominális betonfedéssel. A háló átmérője ≥2 mm, ≤ 50x50 mm raszterben. A nominális betonfedés minimum 40 mm legyen.
  - B módszer: A betonfelület réteges leválása, amit kísérletekkel kell ellenőrizni, nem megengedett az A módszernél.
  - C módszer: Védőréteg alkalmazása a betonfelületek leválásának elkerülése végett.
  - D módszer: 2 kg/m^3 polipropilén szál alkalmazása.

A nagyelemes kísérletek mellett azonban a kiselemes kísérletek során is bekövetkezik a próbatestek robbanásszerű tönkremenetele. Ílyen típusú vizsgálatot többet lehet találni a szakirodalomban. A szakirodalom a nagyszilárdságú és az öntömörödő betonokat tartja különösen veszélyesnek a betonfelület leválásának szempontjából [15-18].

Saját kutatásaim során is megállapítottam [19], hogy a szál nélküli betonok esetén (M1, C20/25 N/mm^2; M430/37 N/mm^2; M7 50/60 N/mm^2) a nyomószilárdság növekedésével megnövekedett a robbanásszerű leválás esélye. Míg az M1-es próbatestek esetében a próbakockák, valamint a hasábok is épek maradtak, és további vizsgálatokra alkalmasak, addig a nagyobb szilárdságú M4-es próbatestek közül a próbakockák 500 °C-on már tönkrementek, a hasábok 800 °C-on robbantak szét, az M7-es keverékben pedig mind a kockák mind a hasábok 300 °C felett már tönkrementek. Ezen kísérletek alapján megállapítható, hogy a betonfelület leválása már a

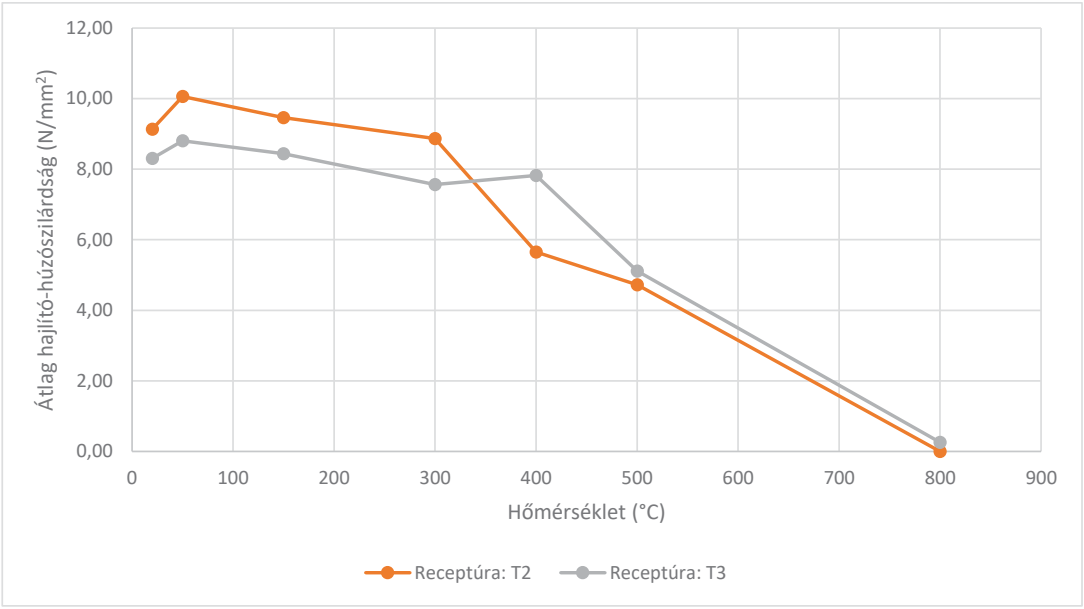
C50/60 betonszilárdság esetén is bekövetkezhet. A beton robbanásszerű leválását műanyagszál adagolással tudtuk megakadályozni.

2. A KÍSÉRLET MÓDSZERE

2.1 Kiselemes vizsgálatok

A nagyelemes vizsgálatok előtt a betonösszetételek laborvizsgálatát végeztük el. Az elkészült próbatesteket 1 napos korukban kizsaluztuk, majd 7 napos korukig meszes vízben, ezt követően 28 napos korukig laborlevegőn (20 °C) tároltuk, A beton 28 napos korában kezdtük el a hőterhelést. A vizsgálat során szabványos ISO 834 szerinti hőmérséklet-idő görbével fűtöttük fel az elektromos kemencét, összesen 6 db hőmérsékleti lépcsőt alkalmaztunk 20 °C, 150 °C, 300 °C, 500 °C, 800 °C. Minden egyes próbatestet 120 percig hő terheltük, ezzel biztosítva a próbatestek egyenletes átmelegedését. A tűzterhelés után a próbatestek laborlevegőn (20±3 °C) hűltek ki. A próbatesteket teljes visszahűlés után vetettük alá a további vizsgálatoknak.

A nyomószilárdság vizsgálatot 150x150x150 mm élhosszúságú már hőterhelt és laborlevegőn lehűlt próbakockákon végeztük. A töréseket ALPHA 3-3000 S típusú törőgépen törtük el. A törőgép terhelési sebessége 11,25 kN/s volt. A tervezett betonszilárdság a TT panel esetén C50/60, a falpanel esetén C30/37 volt. A nyomószilárdság vizsgálat eredményeit az *1. ábrán* adjuk meg. Jól látható, hogy a kezdeti nyomószilárdság értéke jóval meghaladta a tervezett nyomószilárdság értékét. A falpanel esetén a próbatestek 500 °C-os hőterhelés követően felrobbantak a kemencében ezért a szilárdságát nem tudtuk megmérni és 0 N/mm^2-re vettük fel.



2. ábra: Hasábon mért átlag hajlító-húzószilárdság a hőmérséklet függvényében

A kutatás során a korábbi kiselemes laborvizsgálataink elkészítése után nagyelemes vizsgálatokat terveztünk a nagyelemes vizsgálatok során TT paneleket és falpanelelemeket vizsgáltunk.

2.2 TT panelelemek

TT födémelemek esetén a tűzállósági vizsgálat az MSZ prEN 1365-2:2012 [19] szabvány szerint történt, a vizsgálat során magasépítési szerkezeteknél használatos szabványos tűzhatást alkalmaztuk [20].

A gyártás során a 4600 × 1730 × 380 mm méretű vasbeton TT födémelem 80 mm vastag vízszintes részét 90 mm vastag monolit vasbeton réteggel (felbetonnal) építettük be *(3. ábra).* A TT födémelem tűzállósági vizsgálatát a fesztáv harmadaiban a tűzhatással egyidejűleg működtetett terhelés mellett folytattuk le. Számításaink alapján a vonal menti terhelés mértéke a tűzállósági szempontból mértékadó nagyságú, 139,0 kN (2 × 69,5 kN) volt, amit az MSZ EN 1991-1-2 [15] alapján határoztunk meg, tűzteherre számított rendkívüli teherkombinációból.

A terhelést 4 db hidraulikus henger segítségével oldottuk meg. A terhelést a vizsgálat megkezdése előtt 15 perccel kezdtük el, hogy a teherátrendeződés még vizsgálat megkezdése előtt bekövetkezzen.



3. ábra: TT panel a beépítés után (fotó Szentendre ÉMI)

2.3 Egyrétegű fal-panelelemek

A fal-panelelem vizsgálata az MSZ EN 1365-1:2013 szabvány előírásai szerint történt. A pillérekből és falpanelekből álló falszerkezetek tűzállósági vizsgálatát a pillérek hossztengelyében a tűzhatással egyidejűleg működtetett terhelés mellett folytattuk le. A pillér középpontos terhelésének mértéke a tűzállósági szempontból mértékadó nagyságú, 10 kN volt, amit az MSZ EN 1991-1-2 alapján határoztunk meg, tűzteherre számított rendkívüli teherkombinációból.

A vizsgálathoz 3 db lágy vasalású, egyrétegű (homogén) vasbeton falpanel és 2 db teherhordó vasbeton pillér került beépítésre *(4. ábra).* A gyártó szakemberei először a két vasbeton pillért helyezték el a laboratórium által biztosított acél vizsgálókeretben, majd lapos acélokkal és L alakú acél profilokkal rögzítették azokat a keret alsó részéhez. Ezt követően helyezték el a 400 × 400 mm keresztmetszetű és 3450 mm magas pillérek közé az egyrétegű, 200 mm vastag vasbeton falpaneleket.



4. ábra: Falpanel a beépítés után (fotó Szentendre ÉMI)

3. AZ ELEMEK TŰZÁLLÓSÁGI HATÁRÉRTÉKÉNEK SZÁMÍTÁSA

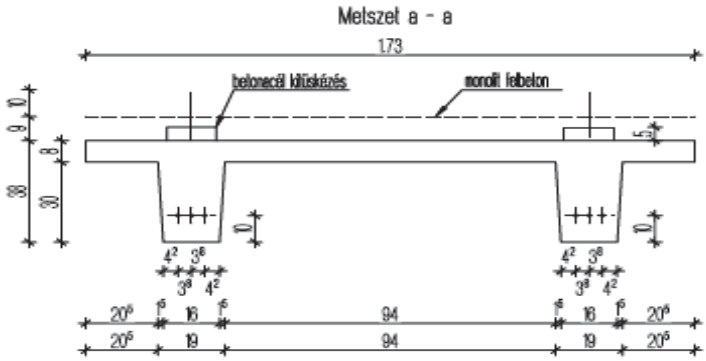
A tűzvizsgálat előtt a várható tűzállósági határértéket az MSZ EN 1992-1-2 [15] táblázatos módszere alapján határoztuk meg. Ez a módszer abban nem tesz különbséget, hogy a beton szálerősítésű vagy nem. A módszer C50/60-as betonszilárdságig használható.

3.1 TT panelelemek számítása

A módszerhez szükséges alapadatok *(5. ábra):*

- A födém vastagsága felbetonnal: 80+90=170 mm
- Az acélbetétek tengely távolsága a födém esetén az elem szélétől: 25+12/2=31 mm

A táblázatos módszerrel számolt tűzállósági határérték az *1. táblázat* alapján: **REI 30**.



5. ábra: A TT panel szerkezeti rajza (gyártó adatszolgáltatása)

1. táblázat: Födémek teherbírása [15]

Szabványos tűzállóság	Minimum méretek (mm)	
	födémvastagság "h_s"	tengelytávolság "a"
1	2	3
REI 30	150	10*
REI 60	180	15*
REI 90	200	25
REI 120	200	35
REI 180	200	45
REI 240	200	50

3.2 Fal-panelelemek számítása

A számításhoz szükséges alapadatok:

- A fal-panelelem vastagsága: 200 mm
- Az acélbetétek tengely távolsága a falelemek esetén az elem szélétől: 25+10/2=30 mm

A *2. táblázatban* az MSZ EN 1991-1-2 [5] táblázatos módszerének falakra használt táblázata látható, az 1. szám a fal vastagsága, a 2. szám az acélbetétek súlypontjának minimális távolsága az elem szélétől.

A táblázatos módszerrel számolt tűzállósági határérték a *2. táblázat* alapján: **REI 90**

2. táblázat: Falak tűzállósági határértéke [15]

Szabványos tűzállóság	Minimális méretek (mm)			
	Fal vastagsága/ az acélbetétek tengelytávolsága			
	μ_{fi}=0,35		μ_{fi}=0,7	
	egy oldalon tűzterhelt fal	két oldalon tűzterhelt fal	egy oldalon tűzterhelt fal	két oldalon tűzterhelt fal
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60

Az oszlopok minimális mérete: 400 mm

Az acélbetétek tengely távolsága az oszlopok esetén az elem szélétől: 25+25/2=37,5 mm

A *3 táblázatban* az MSZ EN 1991-1-2 [5] táblázatos módszerének oszlopokra használt táblázata látható, az 1. szám az oszlop minimális keresztmetszeti mérete, a 2. szám az acélbetétek súlypontjának minimális távolsága az elem szélétől.

A táblázatos módszerrel számolt tűzállósági határérték a *3. táblázat* alapján: **R 120**

3. táblázat: Oszlopok tűzállósági határértéke [15]

Szabványos tűzállóság	Minimális geometria méretek (mm)			
	Oszlop szélesség b_{min}/acélbetétek tengelytávolsága az elem szélétől			
	Több mint egy oldalról tűzterhelt oszlop			egy oldalról tűzterhelt oszlop
	μ_{fi}=0.2	μ_{fi}=0.5	μ_{fi}=0.7	μ_{fi}=0.7
1	2	3	4	5
R 30	200/25	200/25	200/32	155/25
			300/27	
R 60	200/25	200/36	250/46	155/25
		300/31	350/40	
R 90	200/31	300/45	350/53	155/25
	300/25	400/38	450/40**	
R 120	250/40	350/45**	350/57**	175/35
	350/35	450/40**	450/51**	
R 180	350/45**	350/63**	450/70**	230/55
R 240	350/61**	450/75**	-	295/70

Itt megjegyzem, hogy jelen módszer csak a tűzállóság közelítő ellenőrzésére alkalmas, a szerkezetben bekövetkező alakváltozásokat nem veszi figyelembe.

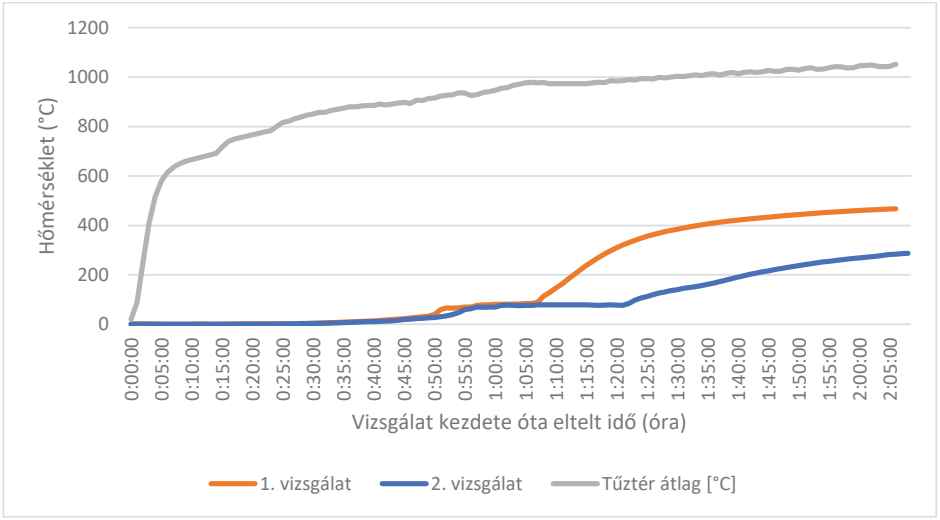
4. A TŰZVIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

4.1 TT panel vizsgálati eredményei

A TT födémelem vizsgálatát először a gyártó által elkészített etalon recepttel készítettük el, majd az általunk javasolt recept módosítással. A recept módosítása során 1 kg/m^3 száladagolást terveztünk a betonfelület leválásának elkerülése érdekében. A két TT födempanel tűzállósági vizsgálata során megállapítottuk, hogy a panelelemek mindkét esetben (etalon és módosított összetétel) átmelegedési határállapotra (egy ponton elérte 180 K-nél nagyobb átmelegedési határállapotot) mentek tönkre. Mindkét vizsgálat során a középső részen volt az átmelegedés a legnagyobb, ezért ezen pont hőmérséklet emelkedését adjuk meg *(6. ábra).*

A vizsgálatok alapján a következő következtetéseket vonjuk le:

- a födempanelek felső felületének felmelegedése a felület középpontjában jellegében hasonlóságot, mértékében viszont eltérést mutat:
  - a hőmérséklet-emelkedés mindkét födémnél az 50. perc körül egy kisebb ugrást mutat, az ezt követő felmelegedés a módosított recepttel készült elem esetén jóval lassabb,
  - az etalon vizsgálatánál a 66. percben, a módosított betonnal készült elem esetén a 81. percben a hőmérséklet-emelkedés egy jelentősebb ugrást mutat, azonban az emelkedés mértéke a módosított betonnal készült elem esetén sokkal kisebb mértékű, mint az etalonnál.



6. ábra: A hőmérséklet emelkedése a TT panel esetén (összehasonlítás)

- a födémpanelek tűztéri oldalán a beton lepattogzása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el (*7. a) ábra*),
- a módosított receptnél a tűzvizsgálat közben a felbeton és TT panel betonja elvált egymástól, ennek magyarázata az lehet, hogy a TT panel műanyagszáladagolással készült, a felbeton viszont nem (*7.b) ábra*),
- a betonfelület leválásának mértéke a módosított recepttel készült elem esetén jelentősen kisebb volt, így nagyobb vastagságú felső felület maradt meg, ami magyarázza az előző pontban leírt, kisebb mértékű hőmérséklet-emelkedést, és egyben a nagyobb tűzállósági határértéket (*7.c)és d) ábrák*).

Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték **REI 60** volt, a módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke **REI 90** percre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a födémekre való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 90, ezért az elem további javítása nem szükséges. Fontos megemlíteni, hogy a számított **REI 30** perces határértéket, már az etalon recepttel készült próbatestek esetén is, a betonfelület leválása ellenére meghaladta a szerkezet, tehát ebben az esetben a számítás a biztonság javára tévedett.



a) a TT panel a vizsgálat alatt



b) a felbeton elválása



c) az etalon TT panel a vizsgálat után



c) a módosított TT panel a vizsgálat után

7. ábra: A TT panelek a vizsgálat alatt és után

Itt meg kell jegyezni, hogy a gyártó által beszállított elemek a tervezett betonszilárdságot (C50/60) meghaladták (C60/75), ezzel átlépve a nagy szilárdságú betonok [21,22] tartományába. Az MSZ EN 1992-1-2 ezen szilárdság (C60/75) esetén még nem írja elő kötelezően a műanyagszálak alkalmazását, csak C80/90 betonszilárdság felett, ennek ellenére a műanyagszálak alkalmazásával a betonfelület leválását csökkenteni tudtuk, és ezzel a szerkezet tűzállósági határértékek növelése következett be.

4.2 Falpanel vizsgálati eredményei

A fal-panelelem vizsgálatát először a gyártó által elkészített etalon recepttel készítettük el, majd az általunk javasolt recept módosítással. A recept módosítása során 1 kg/m^3 száladagolást terveztünk a betonfelület leválásának elkerülése érdekében. Az egyrétegű falpanel modell tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűztéri oldalán a betonfelület leválása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, a lepattogzás mértéke a javított összetétellel készült elemek esetén azonban jelentősen kisebb

volt (mind a felületi kiterjedését mind a mélységét tekintve) az etalon vizsgálat adataihoz viszonyítva *(6. ábra)*. Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték **REI 90** volt a módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke **REI 120** perecre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a falakra való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 120, ezért az elem további javítását nem tervezzük. Fontos megemlíteni, hogy a számított **REI 120** perces határértéket (oszlop) a betonfelület leválása miatt az etalon receptből készült elemek esetén nem érte el a szerkezet, tehát ebben az esetben a számítás a biztonság kárára tévedett, a módosított összetétellel azonban már elérte a szerkezet a kívánt határértéket. Jól látható, hogy ebben az esetben a tervezett betonszilárdság C30/37 volt, de a tényleges C70/85 lett, ami miatt a táblázatos módszerrel tervezett tűzállósági határérték alatt maradt a tényleges tűzállósági határérték, ezért javasolt előregyártott elemek esetén a betonszilárdság maximalizálása.



a) etalon



b) módosított recepttel

8. ábra: A falpanelelemek a vizsgálat után

Itt meg kell jegyezni, hogy a gyártó által beszállított elemek a tervezett betonszilárdságot (C30/37) jelentősen meghaladták (C60/75), ezzel átlépve a nagy szilárdságú betonok [21,22] tartományába. Az MSZ EN 1992-1-2 [15] ezen szilárdság (C60/75) esetén még nem írja elő kötelezően a műanyagszálak alkalmazását, csak C80/90 betonszilárdság felett, ennek ellenére a műanyagszálak alkalmazásával a betonfelület leválását csökkenteni tudtuk, és ezzel a szerkezet tűzállósági határérték növelése következett be.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Elsőre ellentmondásosnak tűnhet, hogy a nagyobb betonszilárdság ronthat az épületszerkezetek tűzállóságán. Azonban, amennyiben a beton szilárdsága túllép egy felső korlátot, akkor fokozódik a betonfelületek leválásának veszélye.

Az előregyártás során gyakran előfordul, hogy a tervezettnél nagyobb szilárdsággal készülnek el a szerkezeti elemek. A nagyobb betonszilárdság általában nem okoz teherbírás csökkenést, de a tűzteherre való méretezés esetében komoly problémát jelenthet

A TT födémelem tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűztéri oldalán a betonfelület leválása mindkét esetben (etalon és módosított összetétel) szinte ugyanabban az időben kezdődött el, a lepattogzás mértéke a javított összetétellel készült elemek esetén azonban jelentősen kisebb volt (mind a felületi kiterjedését, mind a mélységét tekintve) az etalon vizsgálat adataihoz viszonyítva. Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 60 volt, a módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 90 percre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a födémekre való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 90, ezért az elem további javítása nem szükséges.

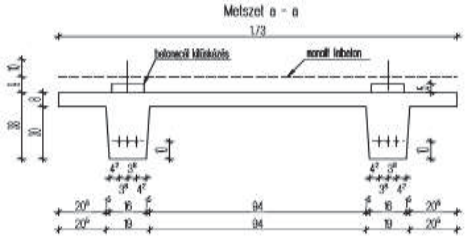
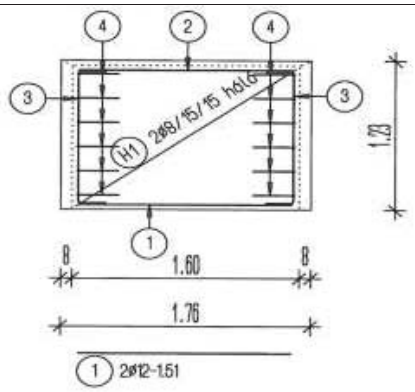
A fal-panelelem vizsgálatát először a gyártó által elkészített etalon recepttel készítettük el, majd az általunk javasolt recept módosítással. A recept módosítása során 1 kg/m^3 száladagolást terveztünk a betonfelület leválásának elkerülése érdekében. Az egyrétegű falpanel modell tűzállósági vizsgálata során mutatott viselkedése alapján megállapítható, hogy a falpanelek tűztéri oldalán a betonfelület leválása mindkét esetben szinte ugyanabban az időben kezdődött el, a lepattogzás mértéke a javított összetétellel készült elemek esetén azonban jelentősen kisebb volt (mind felületi kiterjedését, mind mélységét tekintve) az etalon vizsgálat adataihoz viszonyítva *(6. ábra)*. Az etalon vizsgálata során a tűzállósági határérték REI 90 volt a módosított recepttel készült elem tűzállósági határértéke REI 120 perecre módosult. Jelenleg (OTSZ, 2011) a falakra való előírás magas kockázati osztály esetén (ami a legmagasabb) REI 120, ezért az elem további javítását nem tervezzük. Jól látható, hogy ebben az esetben a tervezett betonszilárdság C30/37 volt, de a tényleges C70/85 lett, ami miatt a táblázatos módszerrel tervezett tűzállósági határérték alatt maradt a tényleges tűzállósági határérték, ezért javasolt előregyártott elemek esetén a betonszilárdság maximalizálása.

Az általam vizsgált elemek számított és mért teherbírását a *4. táblázatban* adom meg. Fontos megemlíteni, hogy a TT panel esetén, de már az etalon recepttel készült próbatestek estén, is a számított **REI 30** perces határértéket a betonfelület leválása ellenére is meghaladta a szerkezet, tehát ebben az esetben a számítás a biztonság javára tévedett. Azonban a falpanelek etalon vizsgálata esetén a számított **REI 120** perces határértéket (oszlop) a betonfelület leválása miatt nem érte el a szerkezet, tehát ebben az esetben a számítás a biztonság kárára tévedett, a számítás, a módosított összetétellel azonban már elérte a szerkezet a kívánt határértéket.

A számított és a kísérletileg meghatározott határértékeket a *4. táblázatban* adom meg.

Itt meg kell jegyezni, hogy a gyártó által beszállított elemek a tervezett betonszilárdságot meghaladták, ezzel átlépve a nagy szilárdságú betonok [20,21] tartományába. Az MSZ EN 1992-1-2 [15] ezen szilárdság (C60/75) esetén még nem írja elő kötelezően a műanyagszálak alkalmazását, csak C80/90 betonszilárdság felett, ennek ellenére a műanyagszálak alkalmazásával a betonfelület leválását csökkenteni tudtuk, és ezzel a szerkezet tűzállósági határérték növelése következett be. A nagyobb betonszilárdság általában nem okoz teherbírás csökkenés, de a tűzteherre való méretezés esetében komoly problémát jelent. Az előregyártásban használt betonok esetén szükséges egy felső szilárdsági korlát bevezetése a szerkezetek tűzvédelmi teljesítőképessége szempontjából. Az MSZ EN 1992-1-2 [15] csak C 80/90 betonszilárdság felett írja elő a műanyagszálak alkalmazását, azaz C 50/60 beton szilárdság felett, javasolt a műanyagszálak adagolása. Ennek magyarázata, hogy a műanyagszálak alkalmazásával a betonfelület leválását csökkenteni tudtuk és ezzel a szerkezet tűzállósági határértékének jelentős növelése következik be.

4. táblázat: A tűzteherre vizsgált elemek szerkezeti rajza és tűzállósági teljesítőképessége

szerkezeti elem sematikus rajza	számított tűzállósági határérték	jelenlegi tűzállósági határérték/ betonszilárdság	javított tűzállósági határérték/ betonszilárdság
	REI 30 C50/60	REI 60 C60/75 betonfelület leválása 8 cm vastagságban átmelegedési határállapot	REI 90 C60/75 betonfelület leválása 5 cm vastagságban átmelegedési határállapot
	falelem REI 90 oszlop R120 C30/37	REI 90 C60/75 betonfelület jelentős leválása, lángáttörési határállapot	REI 120 C 50/60 betonfelület kismértékű leválása, lángáttörési határállapot

Kísérleteink eredményeképp a szabványok szigorítását javasolom. Kísérletileg igazoltam, hogy a vasbeton szerkezeteink tűzbiztonsága érdekében már alacsonyabb C50/60 betonszilárdsági osztályban is elő kell írni a szálak adagolását, mert már ezen betonszilárdságtartományban bekövetkezik a betonfelületek réteges leválása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzője köszönetet mond az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. A tanulmány alapjául

szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program, illetve a Bólyai János Ösztöndíj Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

HIVATKOZÁSOK

[1] Kordina, K (1997): Über das Brandverhalten punktgestützter Stahbetonbalken, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

[2] Khoury, G. A., Grainger, B. N, Sullivan P. J. E (1985): Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, Magazine of Concrete Research, Vol 37, No. 132

[3] Schneider, U., Lebeda, C. (2000): Baulicher Brandschutz, ISBN 3-17-015266-1 W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart

[4] Waubke, N. V. (1973): Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C-Brandverhalten von Bauteilen, Dissertation, TU Braunschweig

[5] Hinrichsmeyer, K. (1987): Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig

[6] Hertz, K.D. (2005): Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, Volume 38, Issue 2, 2003, Pages 103-116, ISSN 0379-7112, http://dx.doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6.

[7] Hertz K.D. (2003) Limits of spalling of fire exposed concrete, Fire Safety Journal, 38 (2), pp. 103-116

[8] Kodur V.K.R., Wang T.C., Cheng F.P. (2004) Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns,Cement & Concrete Composites, 26 (2), pp. 141-153

[9] Kalifa P., Menneteau F.D., Quenard D.(2000) Spalling and pore pressure in HPC at high temperature Cement and Concrete Research, 30 (12), pp. 1915-1927

[10] Dwaikat, M.B. & Kodur, V.K.R. Fire Technol (2010) 46: 251. https://doi.org/10.1007/s10694-009-0088-6

[11] P. Kalifa, G. Chene, C. Galle High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure, Cement & Concrete Composites, 31 (10) (2001), pp. 1487-1499

[12] Høj, N., P. (2005): Fire Desin of Concrete Stuctures, Proceedings of fib symposium on Keep concrete attractive, (edited by Gy. L. Balázs, A. Borosnyói), 23-25 May 2005 Budapest, pp.: 1097-1105

[13] Mörth, W., Haberland Ch., Horvath J., Mayer A.,. (2005): Behaviour of Optimized Tunnel Concrete with Special Aggregates at High Temperature, Proceedings of Central Europan Congress on Concrete Engneering 8.-9. Sept. 2005, Graz, pp.: 41-50Schneider, U., Lebeda, C. (2000): Baulicher Brandschutz, ISBN 3-17-015266-1 W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart

[14] Walter, R., Kari H., Kutserle W., Lindlbauer W. (2005): Analysis of the Load-bearing Capacity of Fibre Reinforced Concrete During Fire, procedings of Central Europan Congress on Concrete Engneering, 8.-9. Sept. 2005 Graz, pp.: 54-59

[15] Eurocode 2 (2004) prEN1992-1-2: design of concrete structures. Part 1–2: general rules––structural fire design. Comité Europeén de Normalisation (CEN), Brussels

[16] Richtlinie (2005) : *"Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke"* (2005) Wien ÖVBB

[17] Silfwerbrand, J. (2004): Guidelines for preventing explosive spalling in concrete structures exposed to fire, Proceedings of Keep Concrete Attractive, Hungarian Group of fib. 23-25 Mai 2005, Budapest University of Technology and Economics, Budapest: 2005, pp. 1148-1156. - ISBN 963 420 837 1

[18] Zheng W., Li H., Wang Y. (2012): „Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature", Materials and Design, No. 41, pp. 403–409.

[19] MSZ prEN 1365-2:2012

[20] Eurocode 1 (2004) prEN1991-1-2:….. Comité Europeén de Normalisation (CEN), Brussels

[21] MSZ EN 206,

[22] MSZ 4798

Dr. Lublóy Éva PhD egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

lubloy.eva@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-9628-1318

Nagy teljesítőképességű betonok – definíciók, lehetőségek

High performance concretes – definitions, possibilities

Prof. Dr. habil BALÁZS L. György

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar,
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., H-1521 Budapest
balazs.gyorgy@epito.be.hu

XXIV. Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia – ÉPKO

ABSTRACT

The High Performance Concrete (HPC) as well as Ultra High Performance Concrete (UHPC) provide a major step in the development the different concrete types. This definition reflects properties that are beyond the the properties of conventional concretes (see details in the article). A special form of HPC-UHPC concretes is the tailor made concrete. These types of concretes are finding their ways both to new structures and to retrofitting of existing structures.

KIVONAT

A nagy teljestőképességű beton, ill. ultra nagy teljestőképességű beton a betonok fejlődésének fontos állomásait jelentik. Definíciójuk magában foglalja mindazokat a beton tulajdonságokat, amik a szokványos betonok tulajdonságain túlmutatnak (lásd részletesen a cikkben). A nagy teljestőképességű betonok egy megjelenési formája az előre megadott tulajdonságokra készülő (tailor made concrete) betonokat jelentik. Mindezen beton típusok előnyösek új szerkezetek építéséhez valamint szerkezetek rekonstrukciójához.

Kulcsszavak: HPC, UHPC, teljesítőképesség, szálak, w/c, tömörség

1. BEVEZETÉS

A *nagy teljesítőképesség*, ill. *ultra nagy teljesítőképesség* fogalma a betonok világában fokozatosan módosult, alakult az elvárások és igények tükrében. Az angolszász eredetű szóhasználat kezdetben okozott némi nehézséget a magyar ajkú felhasználóknak, lévén, hogy szokatlan volt. Szokatlanságát az okozta, hogy teljesítmény, ill. munka jellegű terminológiát használunk egy sokkal tágabb fogalomkörre.

Idővel megszokottá vált a magyar nyelvben is ez a szóhasználat. Ezt előidézte elsősorban, hogy bevezetésre kerültek társult fogalmak, mint például *teljesítmény nyilatkozat* stb., aminek aktuális jelentését mindig igazítani kellett a konkrét kérdéskörhöz.

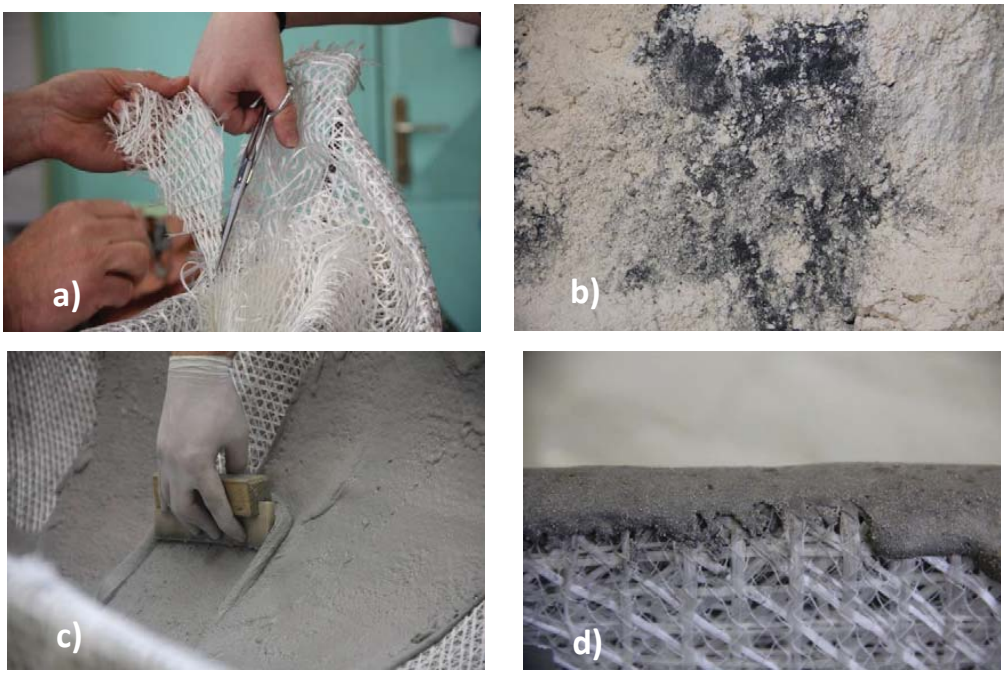
Így mindennapjainkat ma már átszövi teljesítőképesség fogalma különféle formákban. Természetesen ezzel a csupán fogalomkör sokszínűségét kívántam érzékeltetni.

2. ADOTT TULAJDONSÁGOKRA SZABOTT BETON (TAILOR MADE CONCRETE)

Szabad legyen érdekességként előre venni egy viszonylag új fogalmat, ami jól reprezentálja, milyen széleskörű lehetőségeink vannak. Nagyon találó kifejezés jött létre: *tulajdonságra szabott beton (tailor made concrete)*, amivel specifikus tulajdonságok elérését célozzunk meg.

A *1. ábra* egy kétszer göbült felület készítését mutatja, amiben betét is lett elhelyezve alkáliálló üvegszálas szövet formájában. A *1 ábrán* a betétként használt háló méretre szabását láthatjuk éppen és az elem készítésének különböző fázisait.

A beton lemez anyagával kapcsolatosan követelmények: a nagy húzószilárdság, vízzáróság, kis tömeg és kis zsugorodás. Mindezen követelmények együttes elérésére speciális betonkeverékre van szükség.



1. ábra
Tulajdonságra szabott beton készítése (tailor made concrete) speciális alakok és követelmények kielégítésére (Balázs, 2015)
a) Háló méretre vágása, b) Betokeverés, c) Bedolgozás, d) Szilárdulás – Utókezelés

3. BETONOK NAGY TELJESÍTŐKÉPESSÉGE

A nagy teljesítőképesség fogalma a betonok világában az idők során fokozatosan bővült. Kezdetben a nagy teljesítőképesség fogalmán csupán a nagy szilárdságot értettük. Ezért használják még mindig sokan a nagy szilárdság – nagy teljesítőképesség fogalmat.

A tartóssági problémák előtérbe kerülése következtében a teljesítőképesség fokozásán a tartósság fokozott teljesíthetőséget értették, vagyis a leromlás elkerülhetőségét. A tartósság fokozott figyelembevételében segített aztán nekünk az EN 206:2004-es majd EN 206:2013-as európai betonszabvány megjelenés, ahol a figyelem középpontjába elsődlegesen a tartósságot helyezték.

A *nagy teljesítőképesség beton* fogalomköre napjainkban már magában foglalja mindazokat a betonokat és beton tulajdonságokat, amik a szokványos betonok tulajdonságain túlmutatnak. Álljon itt egy részletes felsorolás, ami igyekszik áttekintést adni a nagy teljesítőképességnek tekintett beton tulajdonságokról:

- nagy szilárdság
- nagy kezdőszilárdság
- nagy alakváltozóképesség nyomásra – nagy törési összenyomódás
- nagy alakváltozóképesség húzásra – nagy szakadó nyúlás
- kiemelkedő tartósság – hosszú tényleges élettartam jelentős felújítás nélkül (azaz hosszú használati élettartam)
- környezeti hatásokkal szembeni fokozott ellenállóképesség
    - fokozott fagyállóság
    - fokozott vízzáróság
    - fokozott kopásállóság

  - agresszív anyagokkal szembeni ellenállóság
  - kis víz- és gáz-permeabilitás
- jó bedolgozhatóság
- könnyű alkalmazhatóság
- kiemelkedő tűzállóság
- kiemelkedő földrengésállóság
- korlátozott repedéshajlam
- kis zsugorodás
- kis kúszás
- kis CO_2 lábnyom
- alacsony ár.

Ez a lista továbbfejlesztett változata a Balázs (2015) cikkben megjelentnek. A jövőbeni lehetőségek fejlődése miatt nem kizárt, hogy ez a lista még bővülni fog. Ezek a betonok és beton tulajdonságok előnyösek új szerkezetek építéséhez valamint szerkezetek rekonstrukciójához is.

Jelen cikkben a fenti, részletes lista néhány elemére szeretnék kitérni részleteiben.

4. SZÁLAK A NAGY TELJESÍTŐKÉPESSGŰ BETONBAN

A nagy teljesítőképesség kifejtésének nem alapfeltétele a szálak használata a betonhoz, de a tulajdonságok jelentős mértékű megváltozásához – a nagy teljesítőképesség biztosításához – legtöbbször szálak használatával jutunk el. A 20. század végén és a 21. század elején szilárdsági, az alakváltozási, ill. a tartóssági tulajdonságok elérését a szálak alkalmazásával sikerült elérni.

A szálerősítésű betonok (FRC) elterjedése az 1960-as években vált ismeretessé (Romualdi, Mandel, 1964). A beton keverék tervezés és az adalékszerek fejlődése kiváltotta a nagy teljesítőképességű (HPC) és az ultra nagy teljesítőképességű (UHPC) betonok megjelenését. Amennyiben a nagy teljesítőképességű (HPC) és az ultra nagy teljesítőképességű (UHPC) betonok szálakkal készülnek, akkor a pontos megnevezésük nagy teljesítőképességű szálerősítésű betonok (HPFRC), ill. ultra nagy teljesítőképességű szálerősítésű betonok (UHPFRC).

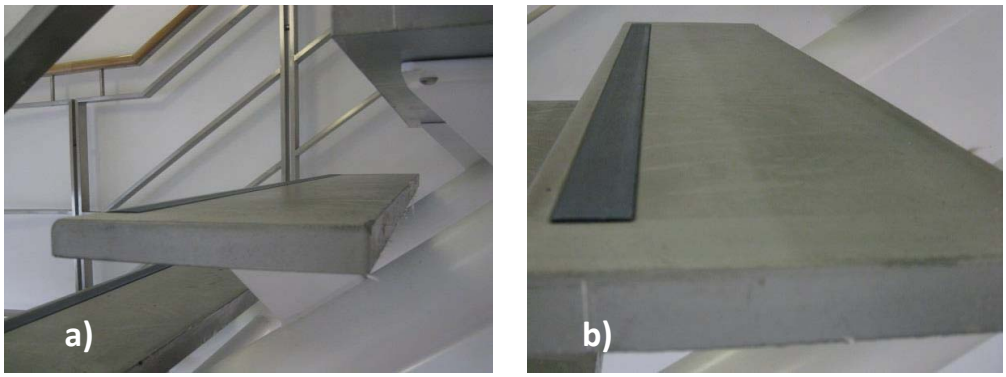
A beton tulajdonságok javulását az acélszál tartalom növelése során is tapasztalhatjuk. Az FRC tartományán keresztül eljuthatunk az UHPFRC betonok tartományáig, a következő változásokat tapasztalva: a szívósság (energia elnyelő képesség) javulása; kedvezőbb repedéskép kialakulása (kisebb távolságú és tágasságú repedések), ami hozzájárul a tartósság fokozásához; a nyírás teherbírás növekedése; majd végül a legnagyobb száltartalmak esetén a nyomó-, ill. a húzószilárdság növekedése.

A *2. ábra* mutat példát a nagy alakváltozó képességre egy vékony, szálerősítésű beton lemez esetében, ami az ún. SIFCON (Slurry Infiltrated Concrete) módszerrel készült. A szálak kerültek először a zsaluzatban, és azokra öntötték rá a cement habarcsot, ami viszkozitása révén be tudott folyni a szálak közé.



2. ábra
Nagy alakváltozó képesség (Orban, Balázs, 2002)

A *3. ábrán* lépcsőkar jó példa műanyag szálerősítésű UHPC esetére, amikor is szerkezetileg egyszerű elemre elegáns megoldást találtak.



3. ábra
UHPC lépcsőelem
a) Oldalirányú nézet b) Fölülnézet

5. ADALÉKANYAG TERVEZÉS, TÖMÖRSÉG (PACKING DENSITY)

Az adalékanyag tervezés és a tömörség (angol terminológia szerint: packing density) kulcsszerepet játszik az UHPC betonok tervezésben.

Fennis doktori értekezése (Fennis, 2011) az adalékanyag szemmegoszlásának elemzésén alapszik. Fennis kísérleti eredménye szerint a cement egy része helyettesíthető finom kitöltő anyaggal miközben a víz-cement tényező csökkenthető. A cementre vonatkozó távolsági tényező bevezetését javasolta a vízigény figyelembe vételére és a szilárdság becslésére.

Egy másik doktori kutatásban (Schmidt, Fehling, 2008) beigazolódott, hogy a cementkő tömörsége és a szilárdsága valamit káros közegekkel szembeni ellenálló képessége jelentősen javítható inert, finom szemcsés kitöltő anyagokkal, amik hozzá járulnak a víz-cement tényező kedvező beállításához is. A gázokkal és folyadékokkal szembeni ellenállóképesség elsődlegesen a víz-cement tényezőtől függ. Minél kisebb a víz-cement (víz-kötőanyag) tényező, annál kisebb a kapilláris pórusok mennyisége a megszilárdult cementkőben, és annál nagyobb a beton környezetből bejutó anyagokkal szembeni ellenálló képessége (Schmidt, Fehling, 2008).

6. AZ UHPC ALKALMAZÁS NÉHÁNY SZÉP PÉLDÁJA

Az elő UHPC gyaloghíd 1997-ben épült Sherbrooke-ban, Canadában, 60 m-es fesztávolsággal. Több, mint 20 év után is kiváló állapotban van (4. ábra) (Aïtcin, 2014; Walraven, Schumacher, 2005). A kéttámaszú, térvázas tartószerkezet gerincét alkotó acél csövek UHPC betonnal lettek kibetonozva, és a szigetelés nélküli pályaszerkezet is UHPC betonból készült (4. ábra). Kis hidratációshőjű cementet választottak, kevesebb, mint 3% C_3A tartalommal, 350 kg/m^3 adagolással. A betonhoz 25 mm hosszú és 0,5 mm átmérőjű acélszálakat használtak. A betonhoz hagyományos vasalást nem alkalmaztak, viszont az 5 m hosszúságú térbeli elemek össze lettek feszítve.

A MUCEM (Museum of European and Mediterranean Civilisations Marseille-ban, MUCEM) megközelítésére épült híd a Marseille-i várból érdekes példa a UHPFRC beton felhasználására mind erőtanilag, mind esztétikailag (Toutlemonde, Resplendino, 2013; Mezzacane, Ricciotti, Teply, Tollini, Corvez, 2013) (5. ábra). Két gyaloghíd épült, amelyek fesztávolsága 115 m és 69 m.

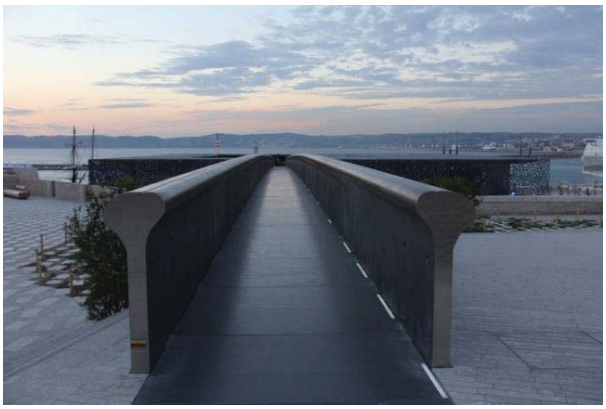
7. MÉRETEZÉSI ELŐÍRÁSOK

Az UHPC szerkezetek tervezésére vonatkozóan fellelhetők már ajánlások. A franciaországi AFGC (Association of French Civil Engineers) elsőként adott ki komplett javaslatot UHPFRC tervezésére 2013-ban (AFGC, 2013).

A ***fib*** (International Federation for Structural Concrete) nemrég jelentette meg a *Bulletin on Constitutive modelling of high strength/high performance concrete* kötetet (*fib*, 2008). Az ***fib*** Model Code for Concrete Structures 2010 (*fib*, 2013) és a MC2020 kidolgozása során a következő fejezetek kerülnek fejlesztésre: *Fibre reinforced concrete*, *Ultra high performance fibre reinforced concrete* és *Performance-based specifications for concrete structures* (Dehn, Beuhausen, 2014).



4. ábra
Az első UHPC gyalog szerkezeti részletei Sherbrooke-ban (Balázs, 2015)
a) Oldalnézet b) Az alátámasztás környéke a feszítőbetétek lehorgonyzásával



5. ábra
UHPFRC híd a vár és MUCEM összekapcsolására Marseille-ben

8. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A nagy teljesítőképességű betonok tulajdonságai jelentősen eltérnek a szokványos betonok tulajdonságaitól, a következő tulajdonságok valamelyikében: nagy szilárdság, nagy kezdőszilárdság, nagy alakváltozóképesség nyomásra – nagy törési összenyomódás, nagy alakváltozóképesség húzásra – nagy szakadó nyúlás, kiemelkedő tartósság – hosszú tényleges élettartam jelentős felújítás nélkül (azaz hosszú használati élettartam), környezeti hatásokkal szembeni fokozott ellenállóképesség (fokozott fagyállóság, fokozott vízzáróság, fokozott kopásállóság, agresszív anyagokkal szembeni ellenállóság, kis víz- és gáz-permeabilitás), jó bedolgozhatóság, könnyű alkalmazhatóság, kiemelkedő tűzállóság, kiemelkedő földrengésállóság, korlátozott repedési hajlam, kis zsugorodás, kis kúszás, kis CO_2 lábnyom, alacsony ár.

A nagy teljesítőképességű betonok összetételét jeletősen meghatározzák a szemeloszlás és a tömörség (packing density), a cement típus és mennyiség, valamint a száltípus és mennyiség. Tervezési előírások vonalán is már van előrelépés (AFGC, 2013; Resplendino, 2014; JSCE, 2008, Uchida, Kunieda, 2014).

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzője köszönetet mond az NVKP_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

9. HIVATKOZÁSOK

AFGC (2013): *Ultra High Performance Fibre-reinforced Concrete*, Recommendations – Revised Edition, Association Francaise de Génie Civil, 358 p.

Aitcin, P.-C. (2014): *The first UHSC structure, 15 years later*, Proceedings of Concrete and Concrete Structures, Vol. of Keynote Speakers, All Russian Conf. Moscow 12-16 May 2014, pp. 15-22.

Balázs, G. L. (2015): “Material and Structural Properties for Creating High Performance Concrete”, *Key Engineering Materials Vols. 629-630 (2015)* pp 21-27 Online available since 2014/Oct/01 at www.scietific.net Trans Tech Publications, Switzerland, Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.21

Dehn, F.; Beushausen, H. (Eds.) (2011): *Performance-based Specifications for Concrete*, Leipzig, Proceedings, ISBN: 978-3-9814523-0-3, 350 p.

Fennis, S.A.A.M (2011): *Design of Ecological Concrete byParticel Packing Optimization*, PhD Thesis, Delft University of Technology

fib (2008): *Constitutive modelling of high strength/high performance concrete*, International Federation for Structural Concrete ***(fib)***, Lausanne, Switzerland, ***fib*** Bulletin 42

fib (2013): ***fib*** *Model Code for Concrete Structures 2010 (MC2010)*, International Federation for Structural Concrete ***(fib)***, Lausanne, Switzerland, published by Wiley-Ernst&Sohn

JSCE Concrete Library International (2008): *Recommendations for Design and Construction of High-performance Fiber-reinforced Cement Composite with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)*, Japan Society of Civil Engineers

Mezzacane, P, Ricciotti, R., Teply, F., Tollini, E., Corvez, D. (2013): *MUCEM: The builders's perspective*, Proc of UHPFRC 2013 Int. Symp. on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, PRO 87, Proceedings of RILEM-***fib***-AFGC, Marseille (2013), ISBN: 978-2-35158-130-8, pp. 3-16.

Orban, Z., Balázs, G. L.: *Rehabilitation of flexural members with high performance concrete*, *Chapter of Book to 60th birthday of Rolf Eligehausen*, *ibidem Verlag* 2002, pp. 469-480.

Resplendino, J. (2014): *French recommendations and feedback of experience on ultra high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC)*, Proc. of 1st ACI-***fib*** FRC Workshop, July 24-25, 2014 Montreal, pp. 44-57.

Romualdi, J.P., Mandel, J.A. (1964): Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement, ACI Journal 1964/6, pp. 657-671.

Schmidt, M., Fehling, E. (2008): Influence of the granulometry and the water content on the strength and density of cement stone, Kassel University, Structura Materials and Engineering Series, Nr. 12, Thomas Teichmann Press (in German)

Toutlemonde, F., Resplendino, J. (Eds.) (2013): *UHPFRC 2013 Int. Symp. on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, PRO 87, Proceedings of RILEM-***fib***-AFGC, Marseille, ISBN: 978-2-35158-130-8, 810p.

Uchida, Y., Kunieda, M. Rokugo, K. (2014): *FRCC – Design and application in Japan*, Proc. of 1st ACI-***fib*** FRC Workshop, July 24-25, 2014 Montreal, pp. 58-68.

Walraven, J., Schumacher, P.: *Applications of UHPC*, Tiefbau 2005/4 pp. 230-234. (in German)

Biró András, Hlavička Viktor, Lublóy Éva

BETONADALÉKANYAG MINŐSÍTÉSE TŰZHATÁSRA

Absztrakt

A természetes kőzet betonadalékanyagok minősége szállítmányonként változó lehet és a kőzet minősége nagyban befolyásolja a beton tűzzel szembeni ellenállását. Ezen okból előnyös lenne egy minősítési rendszer adalékanyagok magas hőmérsékleten való viselkedésére alapozva. Egy ilyen rendszer gazdaságos megoldás lenne egy-egy adalékanyag szállítmány minőségének vizsgálatára ahelyett, hogy minőségbeli eltérések csak a szilárd beton vizsgálatakor derülnek ki. A kutatás célja előzetes vizsgálati eredmények megadása, illetve következtetések levonása. A kutatás során adalékanyag halmazokon, hőterhelést követően Hummel mozsaras vizsgálatot, valamint kiegészítésként derivatográfos illetve pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat végeztünk, hogy jobban megértsük a végbemenő változásokat. A kutatás során kvarckavics, zúzott dolomitos mészkő és zúzott andezit adalékanyagokat vizsgáltunk. A Hummel vizsgálatokat a szemeloszlás megváltozása alapján értékeltük és ígéretes, az ismert kémiai, fizikai változásokat jól követő eredményeket kaptunk, de a későbbiekben nagyobb mintaszámmal, további vizsgálatok elvégzése lesz szükséges a módszer alkalmazhatóságának igazolásához és kalibrálásához.

Kulcsszavak: adalékanyagok, minősítés, tűz

CLASSIFICATION OF AGGREGATES FOR FIRE

Abstract

The quality of the natural stone aggregates change with each shipment and it greatly influences the fire-performance of the concrete. For this reason, it would be advantageous if there would be a classification system for aggregates for fire or fire-related temperatures. The classification of the aggregate itself instead of the concrete could be faster and more economical solution in the long run, it could prevent the need to deconstruct concrete based on 28-day test results in case of an insufficient aggregate. This study aims to provide preliminary measurements and conclusions for such a system based on the Hummel-tests after heat loading with supplementary tests such as scanning electron microscope and derivatograph to better understand the changes of the inner structure. For this study quartz, crushed andesite and crushed limestone were tested. The Hummel tests were evaluated based the changes of the grain size distribution and showed promising results, but further testing is required with more samples to calibrate and to confirm the usability of the method.

Keywords: aggregate, classification, fire

1. BEVEZETÉS

Közel minden esetben figyelembe vesszük tervezés során a tűzhatást, ami közvetetten tűzállósági követelményeket eredményez a felhasznált építőanyagok esetében. Számos példa található a szakirodalomban [1–5], ahol különböző természetes és újrahasznosított adalékanyagok felhasználásával készített betonok tűzállóságát elemzik. Ezek rávilágítanak az adalékanyag megválasztásának és a beton tűzállóságának kapcsolataira, de az adalékanyag minőségét a tűzzel szembeni ellenállása alapján nem határozzák meg a betonban való felhasználást megelőzően.

A természetes kőzet adalékanyagok minősége szállítmányonként eltérő lehet és nagyban befolyásolja a beton teljesítőképességét tűz esetén. Ezért előnyös lenne erre egy külön minősítési rendszer alkalmazása, amely az adalékanyag hőterhelést követő teljesítőképességét veszi alapul. Egy ilyen rendszer gazdaságos megoldás lenne egy-egy adalékanyag szállítmány minőségének vizsgálatára ahelyett, hogy minőségbeli eltérések csak a szilárd beton vizsgálatakor derülnek ki.

Az adalékanyagok hősokk hatására bekövetkező aprózódásának mérése szokványos például aszfaltban történő felhasználás esetén, ahol a forró bitumen hatását modellezik, amely repedésekhez vezethet az adalékanyagban, ezzel befolyásolva a halmazszilárdságot [6].

A felvázolt minősítési rendszer igénye egy fejlesztési projekt kapcsán jelentkezett, mikor C50/60-XC1-11-S1: MSZ EN 206 [7] betonnal készülő 200 mm magas körüreges födémpallók tűzállóságát kellett javítani a geometria és a betonfedés változtatása nélkül. Ezen födémelemeket hosszúpados extrúderes technológiával gyártják. A gyártási technológia megköveteli az S1 konzisztencia osztályú (10-40 mm roskadás) beton alkalmazását, amelynek emellett kellő kezdeti szilárdsággal és állékonysággal kell rendelkeznie, hogy a folyamatosan mozgó gyártó gép által hátrahagyott betonelem ne roskadjon össze és a méretpontosság biztosítható legyen.

Korábbi 2003-ban végzett vizsgálatok alapján a födémpalló üzemi teher esetében 60 perces, ipari terhelésnél (5 kN/m^2) 90 perces tűzállósági határértékkel rendelkeznek. A projekt során végzett előzetes vizsgálatok alapján (2018) azonban a födémpallók 30 percnél is alacsonyabb tűzállóságot mutattak (*1. ábra)*. A födémpallók betonösszetétele alapvetően az adalékanyagban tért el. A 2003-ban gyártott elemekhez kvarckavics, míg a 2018-ban gyártott elemekhez zúzott dolomit adalékanyagot használtak fel.

Mivel az alkalmazott adalékanyag volt az egyetlen lényeges különbség, ezért a különböző betonösszetételek vizsgálata mellett az adalékanyagok vizsgálata is fontos lépés volt a termék fejlesztése során. Az adalékanyagok hőterhelésének szintjeit előzetesen elvégzett derivatográfos vizsgálattal határoztuk meg, majd a halmazok hőterhelését követően Hummel vizsgálatokat végeztünk, végezetül az egyes mintákat megvizsgálatuk pásztázó elektronmikroszkóp segítségével is, hogy a láthatók legyenek a mikroszerkezeti változások. Ebben a tanulmányban a kezdeti mérések eredményeit ismertetjük egy későbbi potenciális osztályozási, minősítési rendszer alapjaihoz.



1. ábra: Hosszanti repedések a körüreges födémpallón 3 perc hőterhelést követően

2. KÍSÉRLETI MÓDSZEREK ÉS VIZSGÁLT ANYAGOK

2.1 Vizsgált anyagok

A vizsgált anyagok megválasztása az alapján történt, hogy jellemző a felhasználásuk olyan beton- és vasbetonszerkezetek esetén, ahol kimondottan fontos szempont a tűzzel szembeni ellenállóképesség. Az alábbi anyagokat vizsgáltuk:

- 4/8 kvarckavics,
- 11/22 zúzott andezit (Nógrádkövesd),

- 11/22 zúzott mészkő (Pilisvörösvár).

2.2 Kísérleti módszerek

Az andezit és a mészkő mintákat vizsgáltuk derivatográffal a hőterhelési hőmérsékletek megfelelő megválasztása érdekében. A kvarckavicsot nem vizsgáltuk ilyen módon, mert csak egy ismert átalakulása van 573 °C-on α-kvarcból β-kvarccá. Fontos azonban, hogy ez az átkristályosodás jelentős térfogatnövekedéssel is jár.

A derivatográfos vizsgálat eredményei alapján 200 °C, 500 °C, 600 °C és 800 °C-os hőterhelési lépcsőket határoztunk meg minden kőzet esetében, valamint vizsgáltuk az anyagot hőterhelés nélkül is (20 °C-os referencia minták).

A halmazszilárdság vizsgálatára az úgynevezett Hummel vizsgálatot alkalmaztuk, amely régebben szabványos vizsgálat volt több európai országban, többek között Magyarországon is [8], de manapság inkább kutatásoknál alkalmazzák. Minden hőterhelt halmazból vettünk mintát pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatokhoz, ahol végeztünk elemanalízist is.

2.2.1 Derivatográfos vizsgálat

A derivatográf (*2. ábra*) egyidejűleg állít elő termogravimetriás (TG), derivatív termogravimetriás (DTG) és differenciált termoanalitikai görbét. A vizsgálathoz kis mennyiségű anyagot porrá kell őrölni, majd a berendezés kemencéjében egyenletesen 1000°C-ig hevíteni [9]. A vizsgálati paraméterek a következők voltak:

- referencia anyag: alumínium-oxid,
- felfűtési sebesség: 10 °C/perc,
- hőmérsékleti tartomány: 20-1000 °C,
- bemért mintatömeg: 200 mg,
- TG érzékenység: 50 mg,
- korund tégely,

- atmoszférikus nyomás.

A mérési eredmények kiértékeléséhez a WINDER (Version 4.4) szoftvert használtuk.

A vizsgált anyag (minta) azon fázisai, melyek a mérési hőmérséklet intervallumában nem szenvednek el semmiféle hőreakciót, a derivatográfiás módszerrel nem elemezhetők. Ha ugyanabban a hőmérséklet intervallumban párhuzamos hőreakciók következnek be, a hőreakciót szolgáltató fázisok DTG és DTA csúcsai átlapolhatnak, többszörös csúcsok vagy vállak (inflexiók) jelennek meg. Ilyen esetekben a fázisok minőségi azonosítása derivatográfiás módszerrel nehézkes vagy nem lehetséges [10].



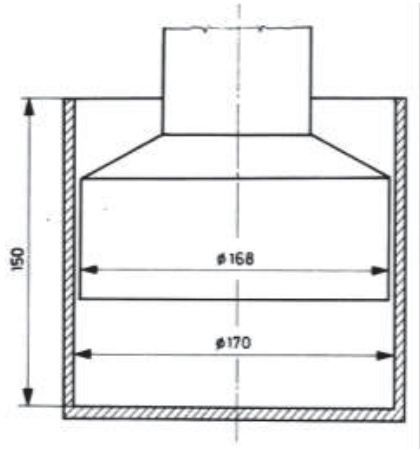
2. ábra: Derivatograph Q-1500D

2.2.2 Hummel vizsgálat

A Hummel vizsgálat egy közvetett halmazszilárdsági vizsgálat, melyet az MSZ 18287-3:1983 [8] szerint végeztünk el. A vizsgálat lépései a következők voltak:

- halmaz kezdeti szemeloszlásának meghatározása szitasorral,
- halmaz terhelése 400 kN-ig 1,5 perc alatt Hummel mozsárban (*3. ábra*),

- tehermentesítés,
- a halmaz szemeloszlásának ismételt meghatározása.



3. ábra: Hummel mozsár vázlatos rajza és méretei [7]

Jelen kutatás esetében a vizsgálat menete a hőterhelés miatt a következőképpen módosult:

- halmaz kezdeti szemeloszlásának meghatározása szitasorral,
- hőterhelés standard ISO 834 [11] tűzgörbe szerinti felfűtéssel és egy órán való célhőmérsékleten tartással (20 °C, 200 °C, 500 °C, 600 °C, 800 °C),
- a halmaz szemeloszlásának ismételt meghatározása,
- halmaz terhelése 400 kN-ig 1,5 perc alatt Hummel mozsárban,
- tehermentesítés,
- a halmaz szemeloszlásának ismételt meghatározása.

A vonatkozó szabvány 2 módszert ad a vizsgálati eredmény értékelésére:

- adott függvény alapján, amely csak bizonyos kezdeti szemeloszlású halazokhoz használható,
- kiértékelés a szemeloszlási görbe megváltozása alapján.

Vizsgálataink értékelését a szemeloszlási görbe megváltozása alapján értékeltük, azonban a vizuális összehasonlítás nyilván nem elegendő. A közelmúltban Gálos és mtsai. [12-13] kidolgoztak egy módszert, ahol a vizsgálatok értékeléséhez egy olyan finomsági modulust definiáltak, ahol csak az adott termékre jellemző szemcseátmérők vannak figyelembe véve. Jelen kutatásban is ezt a módszert alkalmaztuk, ahol a releváns szita átmérőket úgy határoztuk meg, hogy ezeken maradt fenn a vizsgált halmaz 95 m%-a. A vizsgálatot a szabványból kiindulva 2 minta alapján lehet értékelni az átlagukat felhasználva, így a vizsgálatokat minden esetben 2-szer végeztük el, minden vizsgált hőmérséklet és vizsgált adalékanyag esetén. A kísérleti mátrixot a Hummel vizsgálatokhoz az *1. táblázatban* adjuk meg.

1. táblázat: Minták száma anyagonként és hőlépcsőnként

Hőmérséklet	Kvarc	Andezit	Mészkő
20 °C	2	2	2
200 °C	2	2	2
500 °C	2	2	2
600 °C	2	2	2
800 °C	2	2	2
Összes mintaszám:			**30**

2.2.3 Pásztázó elektronmikroszkóp

A SEM analízis egy jó lehetőség az anyagban végbemenő mikroszerkezeti változások követésére. A minták (egy-egy minta hőlépcsőnként és anyagonként) előkészítését követően, amely a minták rögzítéséből, portalanításából majd a felületének vákuumban történő aranyozásából áll, behelyeztük a vizsgált kőzeteket a berendezésbe. Az anyagokat ezt követően 5000x-es nagyításig vizsgáltuk és az elemanalízis funkciót is igénybe vettük.

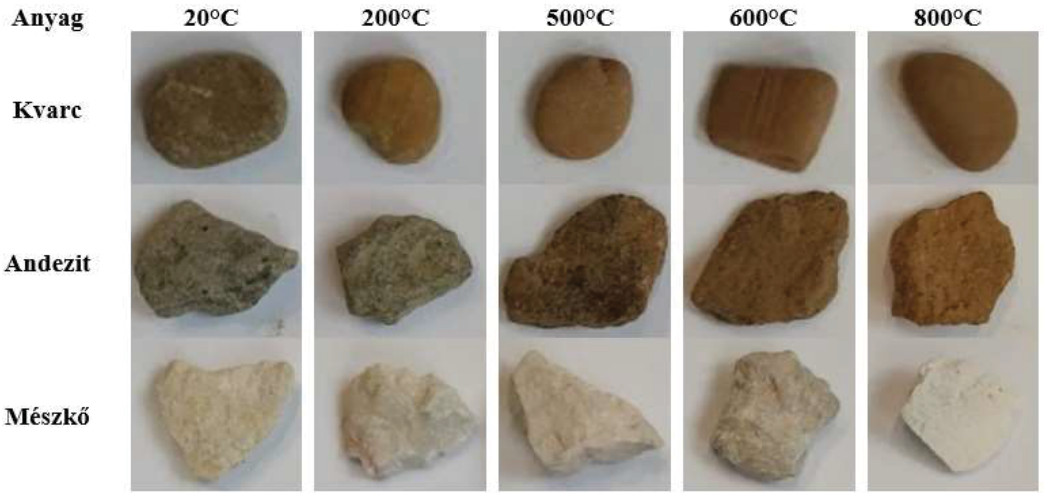
3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1 Szemrevételezés

A hőterhelést követően egy-egy szemcsét kivettünk a halmazokból szemrevételezés (*4. ábra)* és SEM analízis céljából.

A kvarc felülete fokozatosan bemattult és vöröses barnává vált vélhetően a vastartalom oxidációjának köszönhetően. Ez a színváltozás az andezit esetében is észrevehető, azonban ott ez nem ennyire fokozatos és főként 200 °C és 500 °C között játszódott le.

A mészkő sötétebb szürkéssé vált a hőmérséklet növekedésével 600 °C-ig majd ezt követően bemattult, fehérré vált és kevés fehér por jelent meg 600 °C és 800 °C között. Utóbbi változás a $CaCO_3$ oxidációjának köszönhető CaO-á alakult.



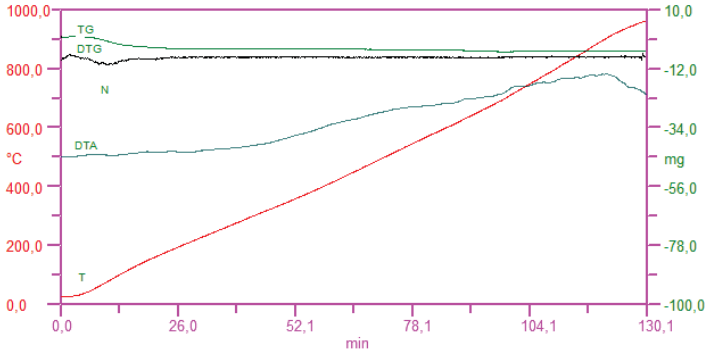
4. ábra: Adalékanyag szemcsék látható elváltozásai hőterhelés hatására

3.2 Derivatográfos vizsgálat

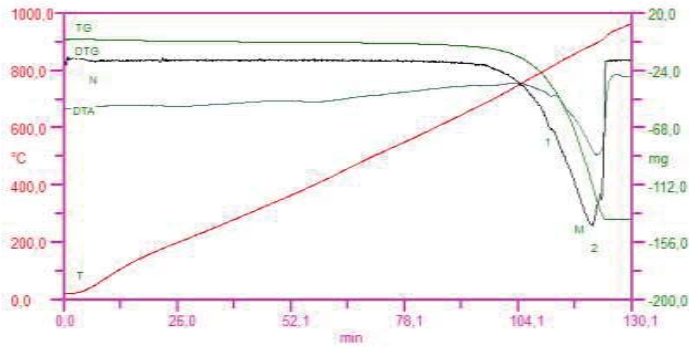
Az andezit és a mészkő minták derivatogramja az *5.* és *6. ábrákon* látható. Az andezit minta esetében csak egy N jelű csúcs látható 20 és 120 °C között, amit a pórusokból eltávozó víz okozza.

A mészkő esetében a következő csúcsok különíthetők el:

- N jelű csúcs: víz távozása a pórusokból 20 és 120 °C között,
- M jelű csúcs: domináns csúcs 650 és 950 °C között, amik a $CaCO_3$ és a $MgCO_3$ oxidációját mutatják:
    - 1. csúcs: $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$
    - 2. csúcs: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$



5. ábra: Andezit minta derivatogramja



6. ábra: Mészkő minta derivatogramja

A megfelelő szoftverrel a tömegváltozások számszerűsíthetők voltak. Ezeket a *2. táblázatban* foglaljuk össze.

Az eredmények alapján az andezit csak a nedvességtartalmát veszíti el a vizsgált hőmérséklet tartományon, a további hőmérsékletre nem érzékeny. A mészkő a 650 és 950 °C közötti bomlásakor tömegének 44 %-át veszíti el, ami lényegében megegyezik a kalcium-karbonát széndioxid tartalmával. Ez arra utal, hogy az anyag fő tömege kalcium-karbonát, amely magnézium-karbonátot (dolomitos részt) csak csekély mértékben tartalmaz.

2. táblázat: Tömegváltozások a vizsgálat során

Megfigyelt fázisok	Andezit	Mészkő
Nedvességtartalom eltávozása (m%)	1,2	0,2
Karbonátokból elvtávozó CO_2 mennyisége (m%)	-	44,2
Izzítási veszteség (m%)	1,8	45,0

3.2 Hummel vizsgálat

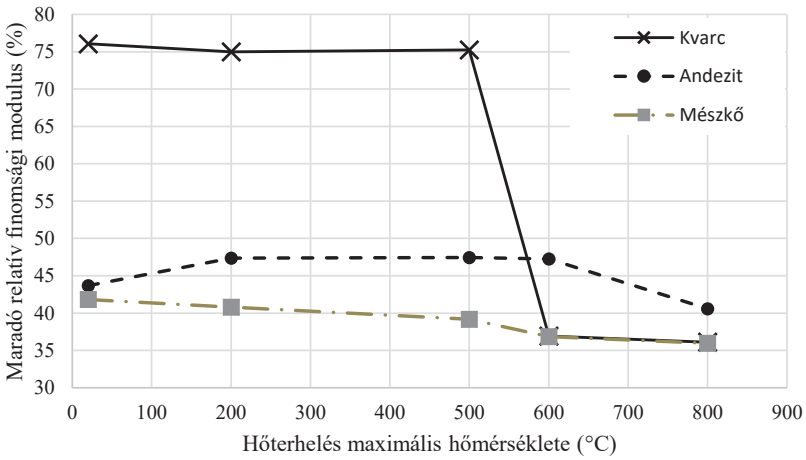
A finomsági modulus számításához (lásd 2.2.2 fejezet) az alábbi szita átmérőket vettük figyelembe az egyes kőzeteknél:

- kvarc: 2 mm, 4 mm, 8 mm,
- andezit: 8 mm, 16 mm, 22,4 mm,
- mészkő: 8 mm, 16 mm.

A hőterhelés önmagában nem okozott jelentős változást a szemeloszlásban (maximum 1%), így a harmadik szitavizsgálat eredményeit az első szitavizsgálat eredményeivel vetettük össze a későbbiekben. A hőterhelés és a Hummel mozsaras terhelés után maradó relatív finomsági modulust a 3.. *táblázatban* és a *7. ábrán* adjuk meg. A Hummel mozsárban összezúzott referencia és a 800 °C-os minták a *8-10. ábrákon* láthatók.

3. táblázat: A hőterhelés és a Hummel mozsaras terhelés után maradó relatív finomsági modulus

Hőmérséklet	Kvarc	Andezit	Mészkő
20°C	76.07%	43.68%	41.81%
200°C	74.98%	47.35%	40.79%
500°C	75.22%	47.44%	39.17%
600°C	36.94%	47.25%	36.86%
800°C	36.09%	40.59%	35.96%



7. ábra: A hőterhelés és a Hummel mozsaras terhelés után maradó relatív finomsági modulus

A kvarc kavics esetében nem volt jelentős változás finomsági modulusban, így közvetve halmazszilárdságban 500 °C-ig. Ezt egy drasztikus csökkenés követte a 600 °C-on hőterhelt mintáknál, majd ismét egy csak kis mértékű csökkenést (kevesebb mint 1%) tapasztaltunk 600 °C és 800 °C között. Az 500 °C és 600 °C között csökkenés a kvarc jelentős térfogatnövekedéssel járó átalakulásának volt köszönhető 573 °C-on [14], ami jellemzően

repedéseket okoz a betonban, de az eredmények alapján magának az adalékanyagnak is csökken a szilárdsága a megváltozott szerkezetnek köszönhetően. Az eredmények azt mutatják, hogy a kvarc előnyös, amennyiben nem számítunk tűzhatásra vagy extrém magas hőmérsékletre adott szerkezet esetében, hiszen itt csökkent legkevésbé a halmazszilárdság 500 °C-ig.



8. ábra: Hummel mozsárban megzúzott referencia (20 °C) (bal) és 800 °C-on hőterhelt (jobb) kvarc minták

Az andezit esetében a kvarchoz képest jelentősen kisebb relatív finomsági modulust tapasztaltunk (41,81%), azonban 200 °C-on kis mértékű növekedést követően (a víz távozásának köszönhetően) ez a kőzet közel hőérzéketlen volt egészen 600 °C-ig. A csökkenés 800 °C esetében 6,66%, de a referencia mintákhoz képest csupán 3,09%-kal mértünk alacsonyabb értékeket, ami kiemelkedően jó tűzhatásra való méretezés esetén.



9. ábra: Hummel mozsárban megzúzott referencia (20 °C) (bal) és 800 °C-on hőterhelt (jobb) andezit minták

A mészkő minták halmazszilárdsága folytonos csökkenést mutatott a hőmérséklet emelkedésével. A mészkőnek volt a legalacsonyabb relatív maradó modulusa minden vizsgált hőmérséklet esetében a 3 kőzet közül. Ennek ellenére a kvarccal szemben előnyös lehet a használata, mert a csökkenés a hőmérséklet növelésével nem olyan drasztikus módon jelentkezik, valamint nincs jelentős térfogatnövekedéssel járó átalakulása a vizsgált hőmérséklet tartományon, amely plusz repedéseket okozhatna a betonban.

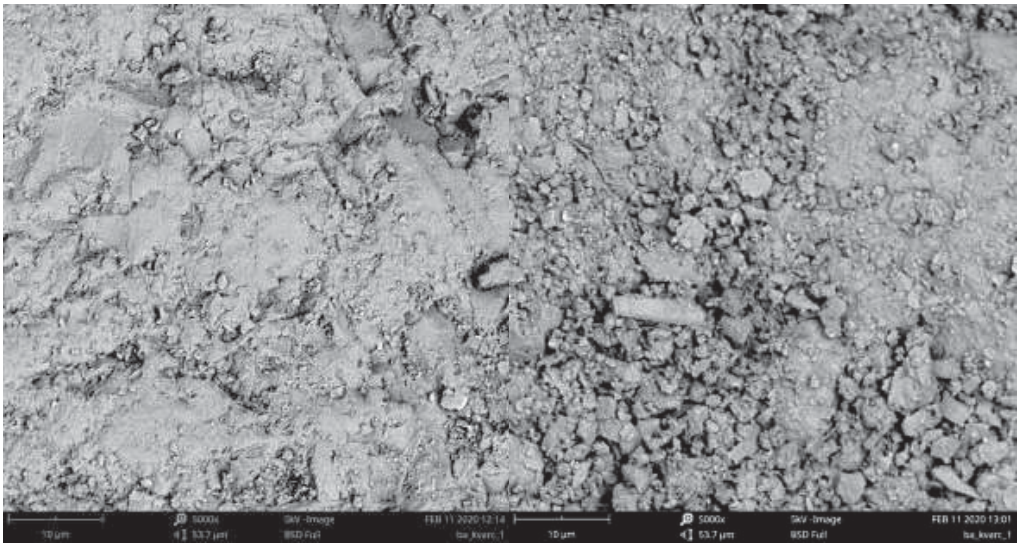


10. ábra: Hummel mozsárban megzúzott referencia (20 °C) (bal) és 800 °C-on hőterhelt (jobb) mészkő minták

3.4. SEM

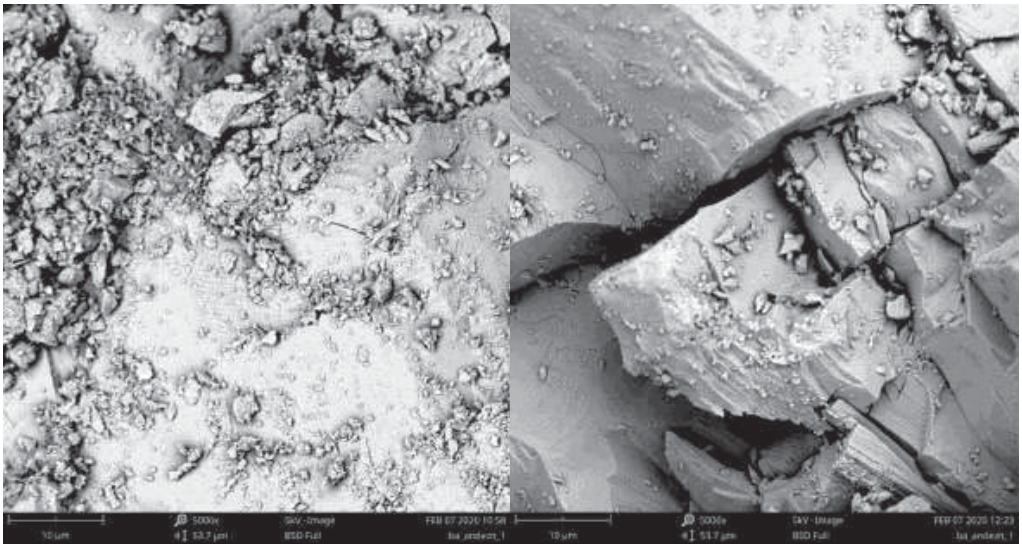
A rendelkezésre álló SEM berendezéssel a mikrostruktúra változásainak követése mellett elemanalízis elkészítése is lehetővé vált. A vizsgálatok célja a tapasztalt halmazszilárdsági változások okainak feltárása, megértése volt. Az elemanalízist kis foltokon végeztük nem pedig előre meghatározott egyenesek mentén, valamint csak egy-egy szemcsét vizsgáltunk így nem tekinthető reprezentatívnak az egész mintára nézve

A kvarc esetében nem mértünk jelentős változást az elemi összetételben. A szilícium-dioxid mellett (ami az összes tömeg közel 80 m%-át adja) főként nióbiumot találtunk minden vizsgált ponton 6-9 m%-ban, valamint kis mennyiségben jelen volt még bróm, vas, platina és alumínium. A szemcse felszínének fokozatos leromlása is megfigyelhető volt, több apró szemcse jelent meg a felszínen az aprózódásnak köszönhetően (*11. ábra).*

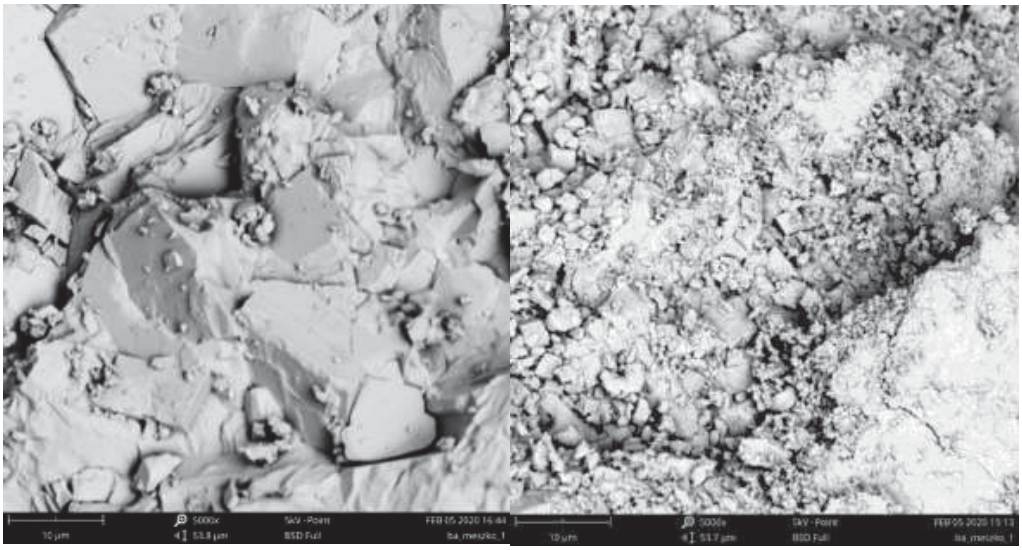


11. ábra: Kvarc szemcsék felülete, referencia (20 °C) (bal) és 800 °C-on hőterhelt (jobb)

Az andezit esetében a felszíni por lemezesebb, élesebb szemcsékből állt és a referencia mintán sokkal nagyobb mennyiségben volt jelen. A hőmérséklet növekedésével 200 °C-on hosszú, de kis tágasságú repedések jelentek meg, amik száma növekedett az emelkedő hőmérséklettel 600 °C-ig. 800 °C-on a repedések száma és a repedések tágassága ugrásszerűen megnőtt, valamint jól láthatóvá vált a levált szemcsék helye a felületen (*12. ábra*). Az andezit fő alkotói oxigén és szilícium voltak (a mért pontokon együttesen 75-80 m%), ezek mellett jellemzően jelen volt még alumínium, vas és nióbium. Voltak mért pontok, ahol a vas tartalom elérte a 46,7 m%-ot is. A hőmérséklet növekedésével nem tapasztaltunk jelentős változást elemösszetétel tekintetében, de a másik két kőzethez képest az egyes alkotók eloszlása az anyagban egyenlőtlenebb, az anyag inhomogénebbnek tekinthető.



12. ábra: Andezit szemcse felülete referencia (20 °C) (bal) és 800 °C-on hőterhelt (jobb)



13. ábra: Mészkő szemcse felülete referencia (20 °C) (bal) és 800 °C-on hőterhelt (jobb)

Ugyanazon nagyítás mellett a mészkő esetében jól látható, hogy a felszínt alkotó blokkos elemek mérete lecsökkent a hőmérséklet növekedésével (főként 600 és 800 °C esetén) (*13. ábra*). A repedések mérete és száma nem növekedett a magasabb hőterhelés mellett. Az elemanalízis alapján ez a kőzet tekinthető a leghomogénebbnek, itt tapasztaltuk az egyes mért pontok között a legkisebb eltérést. A $MgCO_3$ és a $CaCO_3$ oxidációja volt az egyetlen tapasztalt változás az összetétel tekintetében, amit jól mutatott az oxigén-szén arány növekedése.

5. ÖSSZEGZÉS

Jelen kutatás során kvarc kavics, zúzott andezit és zúzott mészkő adalékanyagokat vizsgáltunk, hogy előzetes vizsgálati eredményeket és tapasztalatokat szerezzünk egy tűzre való minősítési rendszerhez kifejezetten betonadalékanyagokhoz. A kőzeteket Hummel vizsgálatnak vetettük alá a hőterhelést követően, majd a vizsgálatokat a szemeloszlás megváltozása alapján értékeltük (maradó relatív finomsági modulus). A finomsági modulust minden esetben csak az adott termékre jellemző szitákon fennmaradt anyaggal definiáltuk, nem a teljes mérettartománnyal. Az eredmények jól követték a kvarc kavics ismert átkristályosodását és a mészkőben a karbonátok oxidációját is.

A kvarc átalakulása 573 °C-on jelentős térfogatnövekedéssel jár, ami repedéseket okoz a betonban (ezzel csökkentve a szilárdságát), de a Hummel vizsgálatok eredményei alapján az adalékanyag halmazszilárdsága is jelentősen lecsökken a belső struktúra megváltozásának köszönhetően. A szilárdság további csökkenése 600 és 800 °C között kevesebb volt mint 1%. Az eredmények azt mutatják, hogy a kvarc előnyös, amennyiben nem számítunk tűzhatásra vagy extrém magas hőmérsékletre adott szerkezet esetében, hiszen itt csökkent legkevésbé a halmazszilárdság 500 °C-ig. A SEM analízis során készített felvételeken jól látható a szemcsék felületének degradációja a hőterhelés maximális hőmérsékletének növekedésével.

Az andezit esetében a derivatográfos vizsgálat nem mutatott termikus reakciókat 1000 °C-ig csak a víztartalomtávozása volt felfedezhető a görbéken, ami a maradó relatív finomsági modulusban is növekedést eredményezett a 200 °C-on hőterhelt minták esetében, ezt követően

pedig csak kis mértékű csökkenés volt tapasztalható 600 °C és 800 °C között. A SEM felvételek ugyancsak nagy repedések megjelenéséről tanúskodnak a 2 legmagasabb vizsgált hőmérséklet esetén. Ezen repedések ellenére a vizsgált adalékanyagok közül ez tekinthető a legoptimálisabbnak a vizsgált kőzetek közül.

A mészkő minták esetében folytonos csökkenést tapasztaltunk halmazszilárdságban a hőmérséklet növekedésével. Ennek a kőzetnek volt a legalacsonyabb a relatív maradó finomsági modulusa minden vizsgált hőmérséklet esetén. Ennek ellenére a kvarccal szemben előnyös lehet a használata, mert a csökkenés a hőmérséklet növelésével nem olyan drasztikus módon jelentkezik, valamint nincs jelentős térfogatnövekedéssel járó átalakulása a vizsgált hőmérséklet tartományon, amely plusz repedéseket okozhatna a betonban.

A Hummel vizsgálat alkalmas volt az anyagokban végbemenő változások számszerűsíthető követésére, de további vizsgálatok szükségesek nagyobb mintaszámmal a módszer kalibrálására és a módszer általános alkalmasságának bizonyítására.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezen kutatás az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-19-3) Ösztöndíj támogatásával készült. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében. A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

HIVATKOZÁSOK

[1] S. Hachemi and A. Ounis, “Performance of concrete containing crushed brick aggregate exposed to different fire temperatures,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 7, pp. 805–824, Aug. 2015, doi: 10.1080/19648189.2014.973535.

[2] X. Yu, Z. Tao, T. Y. Song, and Z. Pan, “Performance of concrete made with steel slag and waste glass,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 737–746, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.217.

[3] J. R. Correia, J. S. Lima, and J. De Brito, “Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 187–199, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.004.

[4] J. Gales, T. Parker, D. Cree, and M. Green, “Fire Performance of Sustainable Recycled Concrete Aggregates: Mechanical Properties at Elevated Temperatures and Current Research Needs,” *Fire Technol.*, vol. 52, no. 3, pp. 817–845, May 2016, doi: 10.1007/s10694-015-0504-z.

[5] C. J. Zega and A. A. Di Maio, “Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 2047–2052, May 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.017.

[6] ÚT 2-3.601, *Útépítési zúzott kövek és kavicsok*, 2009.

[7] MSZ EN 206+A1, *Beton. Műszaki követelmények, teljesítőképesség, készítés, megfelelőség*. 2017.

[8] MSZ 18287-3, *Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon - Hummel vizsgálat*. 1983.

[9] A. Biró, V. Hlavička, and É. Lublóy, “Effect of fire-related temperatures on natural stones,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 92–101, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333.

[10] K. Kopecskó, "Gőzölés hatása a cement klinkerásványainak kloridion megkötő képességére," *PhD értekezés*, 2006.

[11] ISO 834-1, *Fire-ressitance tests - Elements of building construction, Part 1: General requirements*. 1999.

[12] M. Gálos, Á. Orosz, J. P. Radics, and K. Tamás, "Diszkrét elemes számítógépes módszer a vasúti zúzottkő ágyazat viselkedésének modellezésére," *Sínek világa*, vol. 5, pp. 22–28, 2017.

[13] M. Gálos and Á. Orosz, "Ágyazati kőanyagok viselkedésének vizsgálata ismételt terhelés hatására," *Sínek világa*, vol. 1, pp. 10–15, 2019.

[14] U. Schneider and C. Lebeda, *Baulicher Brandschutz*. 2000.

Biro András

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

biro.andrás@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-8373-7291

Dr. Hlavička Viktor PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

hlavicka.viktor@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-5435-4400

Dr. Lublóy Éva PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Technologies, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp 3.

lubloy.eva@epito.bme.hu

ORCID: 0000-0001-9628-1318

Betonadalékanyagok viselkedése magas hőmérsékleten

Performance of aggregates at high temperatures

BIRÓ András[1] doktorandusz, dr. HLAVIČKA Viktor[2] adjuntus,
dr. habil. LUBLÓY Éva[3] docens

[1,2,3] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Építőanyagok és Magasépítés tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rakpart 3.
biro.andras@epito.bme.hu, hlavicka.viktor@epito.bme.hu, lubloy.eva@epito.bme.hu

XXIV. Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia – ÉPKO

ABSTRACT

The quality of natural stone aggregates can vary by every shipment and this greatly affects the fire performance of the concrete it is used in. For this reason, a classification system would be advantageous for aggregates based on behaviour at high temperatures. Such a system would be an economic solution to determine the quality of a shipment compared to measuring the properties only on the 28 days old concrete specimens. The goal of this study was to provide preliminary test results and conclusions. The chosen test method was the Hummel test with additional derivatographic measurement and scanning electron microscopic analysis to better understand the occurring changes. Quartz gravel, crushed limestone and crushed andesite were tested. The Hummel tests were evaluated based on the changes to the grain size distribution and the tests provided promising results, which followed the known chemical and physical changes of the tested materials, but further testing is required with more samples in the future to prove the applicability of the method and to calibrate it.

KIVONAT

A természetes kőzet betonadalékanyagok minősége szállítmányonként változó lehet és a kőzet minősége nagyban befolyásolja a beton tűzzel szembeni ellenállását. Ezen okból előnyös lenne egy minősítési rendszer adalékanyagok magas hőmérsékleten való viselkedésére alapozva. Egy ilyen rendszer gazdaságos megoldás lenne egy-egy adalékanyag szállítmány minőségének vizsgálatára ahelyett, hogy minőségbeli eltérések csak a szilárd beton vizsgálatakor derülnek ki. A kutatás célja előzetes vizsgálati eredmények megadása, illetve következtetések levonása. A kutatás során adalékanyag halmazokon, hőterhelést követően Hummel mozsaras vizsgálatot, valamint kiegészítésként derivatográfos illetve pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat végeztünk, hogy jobban megértsük a végbemenő változásokat. A kutatás során kvarckavics, zúzott dolomitos mészkő és zúzott andezit adalékanyagokat vizsgáltunk. A Hummel vizsgálatokat a szemeloszlás megváltozása alapján értékeltük és ígéretes, az ismert kémiai, fizikai változásokat jól követő eredményeket kaptunk, de a későbbiekben nagyobb mintaszámmal, további vizsgálatok elvégzése lesz szükséges a módszer alkalmazhatóságának igazolásához és kalibrálásához.

Kulcsszavak: tűz, adalékanyag, minősítés, Hummel vizsgálat, halmazszilárdság,

1. BEVEZETÉS

Egy korábbi tanszéki termékfejlesztési projekt során az volt a cél, hogy körüreges födémpallók tűzállóságát javítsuk a geometria és a betonfedés változtatása nélkül. A terméket üzemi terhelés mellett 60 perces tűzállóságra minősítették 2003-ban, majd a projekt kezdetén, 2018-ban végzett vizsgálatok során a födémpalló a 30 perces tűzállósági követelményeknek sem felelt meg. A két födémpalló egyedül a betonban alkalmazott adalékanyag típusában tért el egymástól. A 2003-ban minősített szerkezeti elemnél kvarc kavics, míg a 2018-ban vizsgált födémpallóknál zúzott dolomit került felhasználásra.

Ezen vizsgálatok következményeként felmerült az igény, hogy minősítsük az adalékanyagot felhasználás előtt tűzzel szembeni ellenállóképesség alapján. Bár sok tanulmányban foglalkoznak különböző adalékanyagokkal készített betonok tűz esetén tapasztalható viselkedésével [1–5], minden esetben a kész beton tulajdonságait vizsgálják.

Az adalékanyagok minősítéséhez a Hummel vizsgálatot [6] választottuk, ami egy korábban szélesebb körben alkalmazott szabványos vizsgálat volt halmazszilárdság meghatározásához, de manapság jellemzően inkább kutatásokhoz alkalmazzák. Ezen vizsgálatok eredményeit vettük alapul az adalékanyagok viselkedésének értékeléséhez és a változások követéséhez kiegészítésként végeztünk derivatográfos vizsgálatot, valamint pásztázó elektron mikroszkópos (SEM) analízist is.

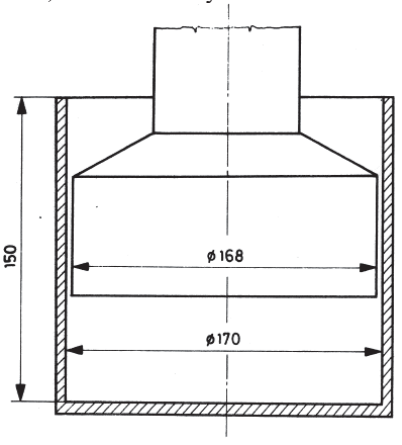
2. VIZSGÁLT ANYAGOK

A vizsgálatokhoz kvarc kavicsot (4/8), zúzott andezitet (11/22, Nógrádkövesd) és zúzott mészkövet (11/22, Pilisvörösvár) alkalmaztunk. Az így megválasztott anyagok között szerepelt a kvarc mellett karbonátos és vulkanikus eredetű kőzet is, valamint ezek mind olyan anyagok, amik jellemzően felhasználásra kerülnek, ha beton vagy vasbeton szerkezetnél kiemelt jelentőségű a tűzzel szembeni ellenállóképesség.

3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Az adalékanyagok minősítésének alapjául a potenciális halmazszilárdsági vizsgálatok közül a Hummel vizsgálatot választottuk, mert tartóssági vizsgálatokhoz illetve a teherbírás csökkenésének kimutatásához jól alkalmazható, későbbiekben diszkrét elemes módszerrel modellezhető [7-8]. A Mikro Deval és a Los Angeles vizsgálatok bár széleskörűen alkalmazottak, a koptató és dinamikus terhelés kevésbé jellemzi a vizsgálni kívánt állapotát az adalékanyagnak az alkalmazás során. A Hummel mozsár vázlatos rajza az *1. ábrán* látható. A Hummel vizsgálat során a vizsgált, ismert szemeloszlású halmazból 2 dm^3-t bemérünk a Hummel mozsárba, majd 400 kN-ig terheljük 1,5 perc alatt, majd a szemeloszlás megváltozása alapján értékeljük a vizsgálatot.

A vizsgált halmazokhoz a hőterhelést az ISO 834 [9] szabványban meghatározott beltéri tűzgörbe szerinti felfűtéssel végeztük, majd a célhőmérsékleten tartottuk 1 órán keresztül. A hőlépcsők minden kőzet esetében 20 °C (referencia), 200 °C, 500 °C, 600 °C és 800 °C voltak. A hőlépcsőket a többi vizsgálatot megelőzően az andezit és a mészkő mintákon elvégzett derivatográfiás vizsgálatok eredményei alapján határoztuk meg. A kvarcot nem vizsgáltuk ilyen módszerrel, ott egy ismert átalakulást feltételeztünk 573 °C-on, mikor átkristályosodik α-kvarcból β-kvarccá.



1. ábra
Hummel mozsár vázlatos rajza és méretei [6]

A derivatográf egyszerre állít elő termogravimetriás (TG), derivatív termogravimetriás (DTG) és differenciált termoanalitikai (DTA) görbéket a porrá őrölt minta hevítése közben. Ezeken a görbéken látható úgynevezett hőbomlási csúcsok alapján megadhatók a vizsgált anyagban végbement hőreakciók.

A Hummel vizsgálatokhoz minta halmazonként 3 szitavizsgálat tartozott. Először meghatároztuk a halmaz kezdeti szemeloszlását, majd ezt megismételtük a hőterhelést követően is. Ezután következett a terhelés a mozsárban, és ezt egy harmadik szitavizsgálat követte. Így elkülöníthető volt a hőterhelés okozta aprózódás a terhelés okozta aprózódástól. A Hummel vizsgálatokat hőlépcsőnként és kőzetenként 2-2 mintával végeztük, majd vettük a vizsgálatok eredményeinek átlagát.

Az egyes hőterhelt mintákból SEM analízishez egy-egy szemcsét kivettünk, majd a szükséges előkészítést követően 5000x-es nagyításig vizsgáltuk az adalékanyag szemcsék megváltozott felületét.

4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

4.1 Derivatográfiás vizsgálat

A derivatográfiás vizsgálat során az andezit esetében csak a nedvességtartalom (1,2 m%) távozásához köthető csúcs volt látható a derivatogrammon és összesen 1,8 m% izzítási veszteséget tapasztaltunk, míg a mészkő esetében a víztartalom 0,2 m% volt összesen 45 m% izzítási veszteség mellett. Utóbbi esetben a karbonátok oxidációja igen jelentős hőbomlási csúcsként jelentkezett 650 °C és 950 °C között. Az ekkor távozó CO_2 a kezdeti tömeg 44,2 m%-a volt, ami lényegében megegyezik a $CaCO_3$ -nak a CO_2 tartalmával és így megállapítható, hogy az anyag $MgCO_3$-ot csak igen kis részben tartalmazott.

4.2 Szemrevételezés

A hőterhelést követő szemrevételezés során megállapítottuk, hogy a kvarc szemcsék a hőmérséklet emelkedésével fokozatosan matt barna színűek lettek. Ezzel szemben az andezit szemcsék esetében a színváltozás a jellemző szürkéről vöröses barnába sokkal kisebb hőmérséklet tartományon ment végbe 200 és 500 °C között. Mind a két kőzet esetében a vastartalom oxidációjának volt köszönhető a szín megváltozása. A mészkő esetében a szemcsék felülete elvesztette a fényét és szürkébb lett 600 °C-ig, majd matt fehér lett a 800 °C-on hőterhelt minták esetében és finom por jelent meg a szemcsék felületén. A mészkő esetében a 800 °C-on tapasztaltak a $CaCO_3$ oxidációjának köszönhetők.

4.3 Hummel vizsgálat

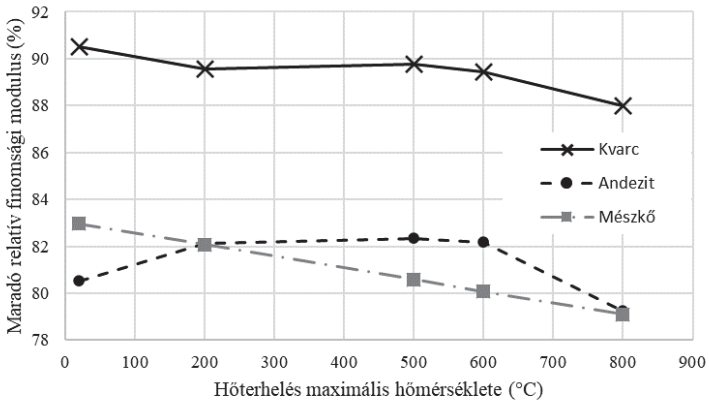
A Hummel vizsgálatok bár közvetetten halmazszilárdságra utalnak, azok értékelését a szemeloszlás megváltozása alapján végeztük, azonban ezt valamilyen módon szükséges volt számszerűsíteni. Ehhez kézenfekvő megoldás lenne a finomsági modulus megváltozásának elemzése. Ezt meg is tettük, az eredmények a *2. ábrán* láthatók, ahol a kezdeti finomsági modulushoz képesti maradó relatív finomsági modulust adjuk meg a hőterhelés maximális hőmérsékletének függvényében. Mivel a szemeloszlás nem változott érdemben pusztán a hőterheléstől, ezért mindig a hőterhelést követő szitavizsgálat eredményeit vetettük össze a mozsárban való terhelést követő mérés eredményeivel.

Az elmúlt években Gálos és munkatársai [7], [8] a Hummel vizsgálatok értékeléséhez egy olyan módszert alkalmaztak, hogy csak az adott termékre jellemző szitákat vették figyelembe a finomsági modulus meghatározásánál. Ezt a módszert alkalmaztuk mi is és összehasonlítottuk a hagyományos módon megadott finomsági modulus változásokkal. Az adott termékre jellemző szitákat úgy határoztuk meg, hogy ezeken maradjon fent az összes tömeg legalább 95 %-a. A kvarc esetében így a 2, 4 és 8 mm, az andezitnél a 8, 16 és 22,4 mm, míg a mészkő esetében a 8 és 16 mm lyukbőségű szitákat vettük figyelembe. Az így kapott maradó relatív finomsági modulus eredményeket a *3. ábrán* ismertetjük.

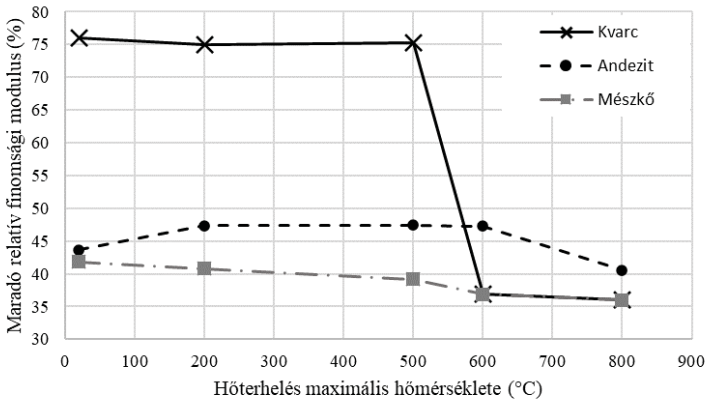
A két értékelési módszer összehasonlításából kitűnik, hogy míg az első esetben minden hőmérsékletnél a kvarcnak a legkedvezőbbek az eredményei, úgy a második esetben 500 és 600 °C között egy jelentős leromlás látható. Utóbbi jobban megfelel a valóságnak, hiszen kvarcnak az 573 °C-on végbemenő átkristályosodása jelentős térfogatnövekedéssel jár, ami nemcsak a betonban okoz repedéseket, de a kvarc kavics szemcsék belső szerkezetét is roncsolja, ami így szintén hozzájárul a beton szilárdságának csökkenéséhez. Ezen okból a termékspecifikus sziták figyelembevétele a

finomsági modulus meghatározásakor jobban követi a végbemenő átalakulásokat, így további vizsgálatoknál is ezt tervezzük alkalmazni. A mészkő és az andezit görbéinek tendenciái a két értékelési módszer szerint hasonlók, de az első esetben a mészkőnek magasabbak az andezitnél a referencia hőmérsékleten meghatározott értékei. A mészkő esetében mind a két esetben egy folytonos csökkenést tapasztaltunk a hőmérséklet növekedésével, míg az andezitnél egy, a nedveségtartalom távozásával magyarázható kezdeti növekedést követően 600 °C-ig közel változatlan eredmények láthatók, amit egy kisebb mértékű csökkenés követ a 800 °C-on hőterhelt mintáknál.

Összességében a vizsgált minták közül az andezit viselkedett tűzállóság szempontjából a legkedvezőbben, de egyértelműen kitűnik a kvarc alkalmazásának előnye, amennyiben nem számítunk 500 °C-nál magasabb hőmérsékletre. A mészkő abból a szempontból kedvező, hogy a halmazszilárdságának csökkenése folytonos, de nem ugrásszerű, mint a kvarcé 500 és 600 °C között.



2. ábra
Maradó relatív finomsági modulus a hőterhelés maximális hőmérsékletének függvényében



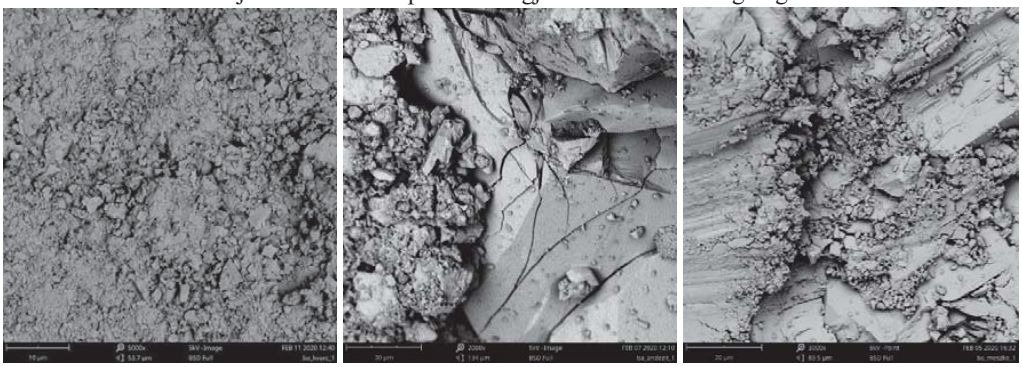
3. ábra
A Hummel mozsaras terhelés utáni maradó relatív finomsági modulus csak termék specifikus szita lyukbőségekkel [10]

4.4 SEM analízis

A mintákból kivett 1-1 szemcsén SEM analízist is végeztünk (*4. ábra*), ami a mikrostruktúra változásainak követését is lehetővé tette. A kvarc esetében a hőmérséklet növelésével megfigyelhető volt a szemcsék felszínének fokozatos leromlása és egyre több apró szemcse jelent meg a felszín aprózódásának köszönhetően.

Az andezit esetében a 200 °C-on és afelett fokozatosan megjelenő repedések voltak hangsúlyosak, melyek száma és tágassága a 800 °C-os minták esetében ugrásszerűen megnőtt.

A mészkő mintákat főként nagyobb blokkos elemek alkották, amik mérete a hőmérséklet növelésével csökkent és jelentős számú repedés is megjelent főként a két legmagasabb hőterhelés esetén.



4. ábra

SEM felvételek, balról jobbra: kvarc, andezit, mészkő

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A betonadalékanyagok tűzre való előzetes minősítéséhez olyan kőzeteket választottunk, amiknek a felhasználása jellemző, ha a beton tűzállósága adott helyzetben fontos szempont. A vizsgálatokhoz kvarckavicsot, zúzott andezitet és zúzott mészkövet használtunk.

A betonadalékanyagok magas hőmérsékleten való viselkedésének értékelésére (kiegészítő vizsgálatok mellett) a Hummel vizsgálatot választottuk, mint halmazszilárdsági vizsgálatot. A Los Angeles és a mikro Deval vizsgálatokkal szemben megvan az az előnye, hogy nem koptató, dinamikus terhelésnek tesszük ki a halmazunkat, hanem egy növekedő statikus terhelésnek, így jobban hasonlít a betonban való alkalmazás körülményeire, illetve a későbbiekben jobban modellezhető.

A vizsgálatok eredményeit két módon értékeltük. Egyszer egy hagyományos módon meghatározott finomsági modulus megváltozása alapján, illetve egy olyan módon definiált finomsági modulus megváltozása alapján, ahol csak az adott termékre jellemző lyukbőségű szitákat vettük figyelembe (kezdetben ezeken marad fenn a termék tömegének 95 %-a). A két módszerrel kapott eredmények összehasonlításából kitűnik, hogy a termékspecifikus sziták figyelembevétele jobban követte a végbemenő fizikai és kémiai változásokat az adalékanyagokban.

Összességében a vizsgált minták közül az andezit viselkedett tűzállóság szempontjából a legkedvezőbben, de egyértelműen kitűnik a kvarc alkalmazásának előnye, amennyiben nem számítunk 500 °C-nál magasabb hőmérsékletre. A mészkő abból a szempontból kedvező, hogy a halmazszilárdságának csökkenése folytonos, de nem ugrásszerű, mint a kvarcé 500 és 600 °C között.

A kapott eredmények ígéretesek, az ismert fizikai és kémiai változásokat jól követik, de további vizsgálatok szükségesek, nagyobb mintaszámmal, hogy igazolni lehessen a módszer alkalmazhatóságát egy potenciáli minősítési rendszerhez.

6. KÖSZÖNETNYIVÁNÍTÁS

Ezen kutatás az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-19-3) Ösztöndíj támogatásával készült. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében. A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

7. HIVATKOZÁSOK

1. S. HACHEMI, A. OUNIS, 2015: Performance of concrete containing crushed brick aggregate exposed to different fire temperatures, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19/7, 805-824
2. X. YU, Z. TAO, T. Y. SONG, Z. PAN, 2016: Performance of concrete made with steel slag and waste glass, Construction and Building Materials, 114, 737-746
3. J. R CORREIA, J. S. LIMA, J. DE BRITO, 2014: Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates, Cement and Concrete Composites, 53, 187-199
4. J. GALES, T. PARKER, D. CREE, M. GREEN, 2016: Fire Performance of Sustainable Recycled Concrete Aggregates: Mechanical Properties at Elevated Temperatures and Current Research Needs, Fire Technology, 52/3, 817-845
5. C. J. Zega, A. A. DI MAIO, 2009: Recycled concrete made with with different natural coarse aggregates exposed to high temperature, Construction and Building Materials, 23/5, 2047-2052
6. MSZ 18287-3:1983 Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon – Hummel vizsgálat
7. M. GÁLOS, Á. OROSZ, 2019: Ágyazati kőanyagok viselkedésének vizsgálata ismételt terhelés hatására, Sínek világa, 1, 10-15
8. M. GÁLOS, Á. OROSZ, J. P. RADICS, K. TAMÁS, 2017: Diszkrét elemes számítógépes módszer a vasúti zúzottkő ágyazat viselkedésének modellezésére, Sínek világa, 5, 22-28
9. ISO 834-1:1999 Fire resistance tests – Elements of building construction, Part 1: General requirements
10. A. BIRÓ, V. HLAVIČKA, É. LUBLÓY, Megjelenés folyamatban: Betonadalékanyag minősítése tűzhatásra, Védelem Tudomány

A BETONOK FAGY- ÉS OLVASZTÓSÓ-ÁLLÓSÁG-VIZSGÁLATI HÁMLÁSÁNAK LASSULÁSI FOLYAMATA





2020/2 • VASBETONÉPÍTÉS

DOI: 10.32969/VB.2020.2.1

Dr. Kausay Tibor – Dr. Nehme Salem G. – Dr. Balázs L. György

A betonok fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóság-vizsgálati hámlása időben lejátszódó folyamat, amely lassuló vagy gyorsuló jellegének korábban nem túl sok figyelmet szenteltünk. A hámlasztásos fagyasztási lassulás is viszonylag új fogalomnak tekinthető, amely fogalom ilyen elnevezésének a nemzetközi irodalomban sem találtuk a nyomát.

E cikkben – amelyet az NVKP 16-1-2016-0019 pályázati támogatásból dolgoztuk ki – a hámlasztásos fagyasztási lassulási feltételt tartalmazó szabványoknak a lassulási feltétellel kapcsolatos intézkedéseit, valamint a lassulási feltétel e szabványokon túlmenő továbbfejlesztésének lehetőségét mutatjuk be.

Kulcsszavak: beton, fagyállóság, fagy- és olvasztósóállóság, hámlasztásos fagyasztási lassulási feltétel

1. BEVEZETÉS

A fagyhatás okozta felületi betonhámlás fogalmára a figyelmet mintegy másfél évtizeddel ezelőtt a CEN/TS 12390-9:2006 európai műszaki specifikáció – amely a mai MSZ CEN/TS 12390-9:2018 műszaki specifikáció eredeti forrása – irányította, amelyben a peremes hámlasztásos és a felszívásos hámlasztásos fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóság-vizsgálati módszert szabályozták.

Ezt követően egyre több betontermék-szabványban kezdték a beton fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóságát, a fagyhatásnak kitett betontermék megfelelőségét vagy meg nem felelőségét a bevezetett hámlasztásos fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóság vizsgálatok eredménye alapján megítélni. E betontermék-szabványok némelyikében – mint például az MSZ EN 138772:2013 és az SN EN 2061/NE:2013 szabványban – a megfelelőség követelményeként nem csak a beton hámlasztásos fagyasztási fajlagos tömegveszteségének bizonyos megengedett mértékét írták elő, hanem a fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóságvizsgálati eredmények értékeléséhez ún. fagyasztási lassulási feltételt is fogalmaztak.

Az MSZ 4798:2016 szabvány 5.5.5. szakaszának (6) bekezdése szerint valamennyi fagy, illetve fagy- és olvasztósóállósági, de különösképpen az XF2 és XF4 környezeti osztályban *ajánlatos* a fagyasztási lassulási feltétel betartása is.

Bevezetésképpen kíséreljük meg a hámlasztásos fagyasztási lassulás fogalmának a meghatározását felépíteni:

- a vizsgálati próbatest felületéről a fagyasztás hatására lemállott anyag (esetünkben szilárd beton) tömegét nevezzük tömegveszteségnek, amelynek a mértékegysége kg;
- a tömegveszteség 1,0 m^2 felületre vetített értékét nevezzük fajlagos tömegveszteségnek, amelynek a mértékegysége: kg/m^2;
- az egymást követő fagyasztási-olvasztási ciklusok (röviden fagyasztási ciklusok vagy ciklusok) azon csoportját, amelynek hatására lemállott összes anyag fajlagos tömegét a hámlási folyamat jellemzéséhez számításba vesszük, tekintsük egy vizsgálati szakasznak;
- a vizsgálat legalább két vizsgálati szakaszból áll;
- a vizsgálati szakaszok terjedelme egy adott vizsgálaton belül azonos, napjainkban általában 14 ciklus, vagy annak egész számú többszöröse;
- két egymást követő vizsgálati szakasz végén meghatározott – a vizsgálat kezdete óta keletkezett – összes fajlagos tömegveszteség különbségét ($m_2 – m_1$) nevezzük fajlagos tömegveszteség-változásnak, amelynek a mértékegysége: kg/m^2;
- az időegységre eső fajlagos tömegveszteség-változást tekintsük a fajlagos tömegveszteség-változás sebességének. Ha időegységnek a vizsgálati szakasz terjedelmét képező ciklusok számát tekintjük, akkor a vizsgálati szakasz terjedelmére vetített fajlagos tömegveszteség-változást nevezzük a vizsgálati szakasz fajlagos tömegveszteség-változási sebességének, amelynek mértékegysége: $(kg/m^2)/$(a vizsgálati szakasz ciklusainak száma);
- ha a vizsgálati szakasz fajlagos tömegveszteség-változási sebessége az előző vizsgálati szakasz fajlagos tömegveszteség-változási sebességéhez képest csökken, akkor a fagyasztási hámlás folyamata lassul, ha növekszik, akkor a fagyasztási hámlás folyamata gyorsul;
- a szabványoknak a vizsgálat végén mért összes átlagos hámlási tömegveszteség megengedett mértékére vonatkozó előírását elsődleges vagy fő-követelménynek, a lassulási feltételt pedig másodlagos vagy mellék-követelménynek, illetve ajánlásnak tekintjük;
- a fő-követelménynek megfelelő fagy-, illetve fagy- és olvasztósóálló betonok fagyasztási hámlási folyamata feltétlenül lassul, ha a vizsgálat félidejében (az előírt összes ciklusszám felénél) mért összes átlagos tömegveszteség a fő-követelmény szerinti érték felénél több.

Eszerint a hámlasztásos fagyasztási lassulás fogalma alatt a fagyállóság-vizsgálati szakasz csökkenő fajlagos tömegvesz-

teség-változási sebességét értjük, amelynek csak a fő-követelmény szerint fagy-, illetve fagy- és olvasztósóálló betonok esetén van másodlagos – előírt, minősítő vagy például, mint az MSZ 4798:2016 szabvány esetén, ajánlott – szerepe.

Cikkünk tehát nem terjed ki a vizsgálat végeredményét tekintve nem fagyálló, illetve nem fagy- és olvasztósóálló betonok hámlasztásos fagyasztási folyamatának tárgyalására, és nem foglalkozunk olyan esetekkel sem, amelyekben a vizsgálat fagyasztási szakaszainak száma kettőnél több.

2. A SZABVÁNYOS HÁMLASZTÁSOS FAGY-, ILLETVE FAGY- ÉS OLVASZTÓSÓÁLLÓSÁG-VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEINEK ÉRTÉKELÉSE LASSULÁSI FELTÉTEL MELLETT

Ismereteink szerint a betonok fagyállósági osztályba sorolásához a fagyállóság vizsgálat alatt lehámló anyag (hámlási veszteség) tömegének ciklusszám-tartományonkénti csökkenését először a betonburkolatok MSZ EN 13877-2:2005 európai szabványában követelték meg, és ugyanaz a szöveg olvasható a szabvány ma érvényes változatában (MSZ EN 13877-2:2013) is: a szabvány 5. táblázata szerint a beton akkor sorolható a legszigorúbb, az FT2 fagyállósági osztályba, ha – függetlenül a mért és a megengedett fagyasztási tömegveszteség viszonyától (arányától, hányadosától) – az 56. ciklushoz tartozó összes mért átlagos tömegveszteség ($m_{56} < 1{,}0$ kg/m^2) és a 28. ciklushoz tartozó összes mért átlagos tömegveszteség ($m_{28} < 0{,}5$ kg/m^2) hányadosa nem nagyobb, mint 2,0, azaz $m_{56}/m_{28} \le 2{,}0$; továbbá az 56. ciklus után mért egyedi tömegveszteségek egyike sem nagyobb, mint 1,5 kg/m^2. Az MSZ EN 138772:2013 szabványban a mért tömegveszteség (tömegcsökkenés) elvárt arányának értéke ($m_{56}/m_{28} \le 2{,}0$) nem ajánlás, hanem követelmény.

A hámlasztásos fagyasztási lassulási feltétel szempontjából figyelemre méltó az EN 2061:2000 európai betonszabvány svájci nemzeti alkalmazási dokumentuma (SN EN 2061/NE:2013) is, amelyben előírják, hogy az XF4 környezeti osztályú fagy- és olvasztósóálló betonok hámlasztásos fagyasztási tömegveszteségének átlaga 200 g/m^2-nél, illetve felső küszöbértéke 250 g/m^2-nél nem lehet nagyobb. XF4 környezeti osztályú fagy- és olvasztósóálló betonnak tekintik azokat a betonokat is, amelyek hámlasztásos fagyasztási tömegveszteségének átlaga legfeljebb 600 g/m^2, illetve felső küszöbértéke legfeljebb 800 g/m^2, ha a 28. ciklus után mért tömegveszteség (Δm_{28}) nem éri el a 6. ciklus után mért (Δm_6) és a 14. ciklus után mért (Δm_{14}) tömegveszteség összegét ($\Delta m_{28} \le (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$, vagyis, ha a 28. ciklushoz tartozó összes mért tömegveszteség (m_{28}) nem nagyobb, mint a 14. ciklushoz tartozó összes mért tömegveszteség (m_{14}) kétszerese: $m_{28} \le 2 \times m_{14}$.

Az európai és svájci lassulási feltétel mintájára hazánkban az MSZ 4798:2016 szabvány – amely az EN 206:2013 európai szabvány magyar nemzeti alkalmazási dokumentuma – 5.5.5. **szakaszának (6) bekezdésében valamennyi XF környezeti** osztályra vonatkozóan fogalmazták meg a hámlasztásos fagyasztási lassulási feltételt, amelynek figyelembevétele a peremes hámlasztásos és a kapilláris felszívásos hámlasztásos fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóság vizsgálat esetén *ajánlott*: ha az előírt N ciklusszámhoz tartozó *összes mért* (tapasztalati) fagyasztási veszteség (m_N) eléri az előírt N ciklusszámhoz tartozó megengedett M_N fagyasztási veszteség felét vagy annál nagyobb ($m_N \ge M_N/2$), akkor az előírt N ciklusszámhoz tartozó *összes mért* fagyasztási veszteség (m_N) legyen kisebb, mint az előírt N ciklusszám felének megfelelő ciklusszámhoz (N/2) tartozó összes *mért* fagyasztási veszteség ($m_{N/2}$) *kétszerese* ($m_N \le y_N = 2 \times m_{N/2}$), ahogy az *1. ábrán látszik*. E két feltétel – azt is figyelembe véve, hogy $m_{N/2} \le m_N \le M_N$ – egy egyenlőtlenséggel is kifejezhető:

$$\frac{m_{N/2}}{2} \le \frac{m_N}{2} \le \frac{M_N}{2} \le m_N \le 2 \times m_{N/2}$$

Más szóval: Az MSZ 4798:2016 szabvány szerint lassul a fagyasztási hámlás folyamata – *értve alatta* azon hámlasztásos fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóság vizsgálatokat, amelyek esetén az előírt N ciklusszámhoz tartozó összes mért (tapasztalati) fagyasztási veszteség (m_N) nem kisebb, mint az előírt N ciklusszámhoz tartozó megengedett M_N fagyasztási veszteség fele ($m_N \ge M_N/2$) –, ha az előírt N ciklusszámhoz tartozó *összes mért* (tapasztalati) fagyasztási veszteség (m_N) az $x = n$ (fagyasztási-olvasztási ciklusok száma) és $y = m$ (fagyasztási tömegveszteség g/m^2 mértékegységben) koordinátarendszerben ábrázolt

$$m = a \times n = \frac{m_{N/2}}{N/2} \times n$$

egyenesnek az $x = n = N/2$ helyen felvett $m = Y_{N/2} = Y_{MIN} = m_{N/2}$ értéke és az $x = n = N$ helyen felvett, a szabványok szerinti $m = Y_N = Y_{MAX} = 2 \times m_{N/2}$ értéke közé esik (*1. ábra*):

$$M_N/4 \le m_N/2 \le \boxed{m_{N/2}} \le m_N \le \boxed{2 \times m_{N/2}},$$

$$\text{azaz } Y_{MIN} \le m_N \le Y_{MAX},$$

ahol a koordináta-rendszer kezdőpontján átmenő $m = a \times n$ egyenesnek

- az $n = N/2$ helyen felvett ordináta-értéke: Y_{MIN}, és
- az $n = N$ helyen felvett ordináta-értéke: Y_{MAX}.

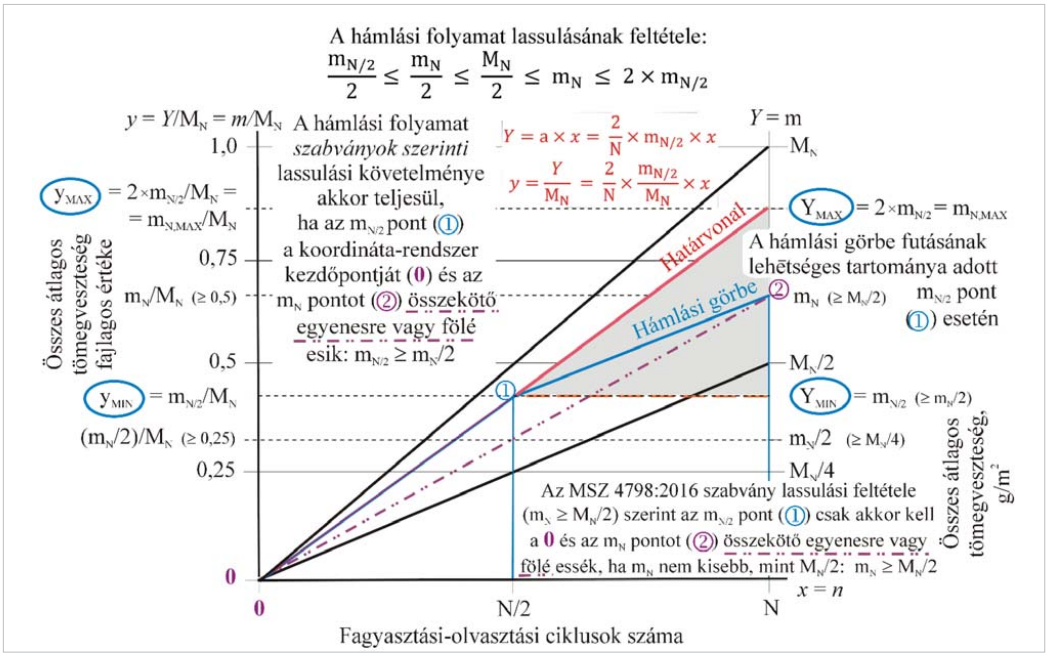
Az $m = a \times n$ egyenes Y_{MIN} és Y_{MAX} közötti szakaszát *határvonalnak* nevezzük. A hámlás folyamata akkor lassul, ha a *hámlási görbe* $n = N/2$ és $n = N$ abszcissza-értékek közötti szakasza nem meredekebb, mint a határvonal, amelynek elnevezése e korlátozó szerep folyománya (*1. ábra*).

A lassulási feltétel teljesülésének megítéléséhez ismerni kell mind az előírt N ciklusszám feléhez tartozó ciklusszám (N/2) után mért összes fagyasztási veszteség ($m_{N/2}$, jele az *1. ábrán*: ①), mind az előírt N ciklusszámhoz tartozó összes mért fagyasztási veszteség (m_N, jele az *1. ábrán*: ②) értékét, amelyekhez a lassulási feltétel szemléltető ábrája is rögzíthető. *Így például az 1. ábra* esetén az ① ($m_{N/2}$) pont (x, y) koordinátái: (N/2, 0,427×M_N) és a ② (m_N) pont (x, y) koordinátái: (N, 0,659×M_N). Az *1. ábrához* tartozó $m_{N/2}$ és m_N összes átlagos tömegveszteség hányadosa: $m_{N/2}/m_N = 0{,}648$ és különbsége: $(m_N - m_{N/2}) = 0{,}232 \times M_N$. Az *1. ábrabeli* példa esetén az MSZ 4798:2016 szabvány szerinti lassulási feltétel:

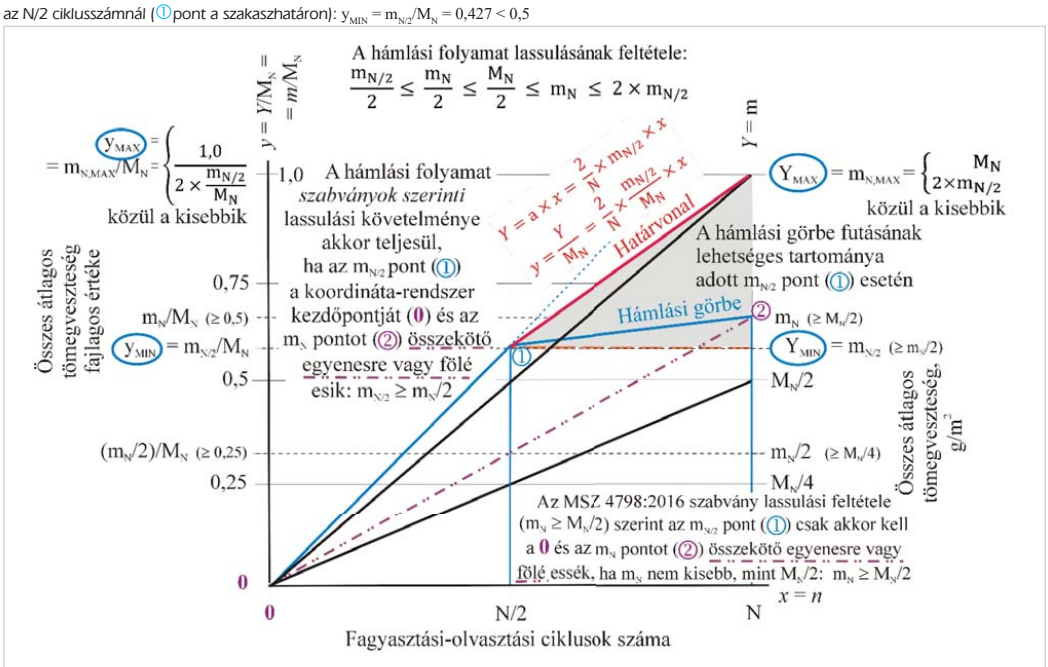
- egyrészt értelmezhető, hiszen: $0{,}659 \times M_N = m_N \ge M_N/2 = 0{,}500 \times M_N$),
- másrészt teljesül, hiszen: $0{,}659 \times M_N = m_N \le 2 \times m_{N/2} = 2 \times 0{,}427 \times M_N = 0{,}854 \times M_N$.

Az *1. ábrán* azt is megfigyelhetjük, hogy az ① ($m_{N/2}$) pontot a koordináta-rendszer kezdőpontját (0) az M_N ponttal összekötő egyenes alatt vettük fel, tehát az *1. ábrabeli* példában: $m_{N/2} < M_N/2$, azaz $y_{MIN} = m_{N/2}/M_N = 0{,}427 < 0{,}5$.

A *2. ábra* olyan esetet szemléltet, amelyben $m_{N/2} > M_N/2$, miáltal az ① ($m_{N/2}$) pont a koordináta-rendszer



1. ábra: *Példa az MSZ 4798:2016 szabvány szerinti hámlasztásos fagyasztás lassulási feltételének szemléltetésére, amelyben a hámlási görbe ordinátája az N/2 ciklusszámnál (①pont a szakaszhatáron):* $y_{MIN} = m_{N/2}/M_N = 0{,}427 < 0{,}5$



2. ábra: *Példa az MSZ 4798:2016 szabvány szerinti hámlasztásos fagyasztás lassulási feltételének szemléltetésére, amelyben a hámlási görbe ordinátája az N/2 ciklusszámnál (①pont a szakaszhatáron):* $y_{MIN} = m_{N/2}/M_N = 0{,}585 > 0{,}5$

kezdőpontját (0) az M_N ponttal összekötő egyenes felett helyezkedik el.

A *2. ábrán* a felvett ① ($m_{N/2}$) pont koordinátái: (N/2, 0,585×M_N), az *1. ábrabelivel* változatlan értékű ② (m_N) pont koordinátái: (N, 0,659×M_N), és a hámlási görbe ordinátája az N/2 ciklusszámnál (szakaszhatáron): $y_{MIN} = m_{N/2}/M_N = 0{,}585 > 0{,}5$. A *2. ábrához* tartozó $m_{N/2}$ és m_N összes átlagos tömegveszteség hányadosa: $m_{N/2}/m_N = 0{,}888$ és különbsége: $(m_N - m_{N/2}) = 0{,}074 \times M_N$.

A *2. ábrán* megfigyelhetjük, hogy ha az ① ($m_{N/2}$) pont a koordináta-rendszer kezdőpontját (0) az M_N ponttal összekötő egyenesen vagy afelett fekszik, azaz $m_{N/2}/M_N \ge 0{,}5$ akkor a ②

(m_N) pont minden lehetséges helyzetében lassuló folyamatot fejez ki, hiszen: $m_{N/2} \geq m_N - m_{N/2}$, azaz $m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$.

Ez azt jelenti, hogy ha a vizsgálat félidejében (N/2 ciklusszámnál) mért összes átlagos tömegveszteség $m_{N/2}/M_N \geq 0{,}5$ és a próbatest a vizsgálat végeredményét tekintve (N ciklusszámnál) a fő-követelmény szerint fagy-, illetve fagy- és olvasztósóálló ($m_N/M_N \leq 1{,}0$), akkor a hámlási folyamat csak lassuló lehet, tehát jellege a gyorsulás szempontjából figyelmet nem érdemel. Az ilyen hámlási folyamat kielégíti az *1. táblázat* szerinti ❶ jelű lassulási feltételt, mint mellékkövetelményt, illetve ajánlást.

A lassulási feltétel N ciklusszám melletti teljesülése egyébként nem biztosíték arra, hogy a hámlás folyamata az N értékét meghaladó, a vizsgálat során nem alkalmazott ciklusszám mellett is lassulna; a hámlás N ciklusszám melletti gyorsulása pedig nem zárja ki, hogy ha a vizsgálatot az N értéknél nagyobb ciklusszámmal is elvégeznénk, akkor a folyamat ne lassulhatna. E bizonytalanságok miatt a lassulási feltétel betartása az MSZ 4798:2016 szabvány szerint *nem követelmény*, de teljesülésének jellegéből a beton fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóságára hasznos következtetések vonhatók le, akárcsak a próbatestek fagyállóság vizsgálat utáni állapotát bemutató fényképekből is, amelyek készítésére a magyar betonszabvány 5.5.5. szakaszának (7) bekezdésében ösztönöznek.

Az európai MSZ EN 13877-2:2013, a svájci SN EN 2061/NE:2013 és a magyar MSZ 4798:2016 szabvány hámlasztásos fagyasztási lassulási feltételeinek jellemzőit az *1. táblázatban* összevetve megállapíthatjuk, hogy e szabványok lassulási feltételei bár hasonlóak, nem mindenben megegyezőek.

Talán a legszembetűnőbb eltérés, hogy

- amíg a magyar szabvány szerint a lassulási feltétel csak akkor érvényes, ha a vizsgálat végéhez tartozó összes mért fagyasztási tömegveszteség (m_N) nem kisebb, mint a vizsgálat végéhez tartozó összes megengedett fagyasztási tömegveszteség (M_N) fele: $m_N \geq M_N/2$, azaz $m_N/M_N \geq 0{,}5$,
- addig az európai és a svájci szabvány szerint a lassulási feltétel független a vizsgálat végéhez tartozó összes mért (m_N) és megengedett (M_N) fagyasztási tömegveszteség viszonyától, és csak a vizsgálatnak a félidejéhez (N/2) tartozó összes mért fagyasztási tömegveszteség ($m_{N/2}$) és a végéhez (N) tartozó összes mért fagyasztási tömegveszteség (m_N) hányadosától függ: $m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$.

Az *1. táblázat* alapján az *1. ábra* segítségével könnyen belátható, hogy ha az $x = n = \mathrm{N}$ függőlegesében fekvő, valamely tetszőlegesen felvett m_N pontot (jele az *1. ábrán*: ②) összekötjük a koordináta-rendszer kezdőpontjával (az *1. ábrán*: 0), akkor valamennyi szabvány szerint a lassulási feltétel teljesüléséhez az $x = n = \mathrm{N}/2$ függőlegesében fekvő $m_{N/2}$ pontnak (jele az *1. ábrán*: ①) az $m_N/2$ és az m_N pont közé kell esnie: $m_N/2 \leq m_{N/2} \leq m_N$. Ennek az egyenlőtlenségnek minden tagját m_N értékkel elosztva azt kapjuk, hogy $(m_N/2)/m_N \leq m_{N/2}/m_N \leq m_N/m_N$, illetve, hogy $0{,}5 \leq m_{N/2}/m_N \leq 1{,}0$, amely utóbbi nem más, mint a szabványok szerinti lassulási feltétel ($m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$), lásd az *1. táblázatban* a lassulási feltétel ❶ sorát; hozzátéve, hogy e feltétel kielégítése az MSZ 4798:2016 szabvány szerint a lassulási teljesüléséhez ugyan szintén szükséges, de nem elégséges, lásd az *1. táblázatban* a lassulási feltétel ❷ sorát.

Fagy-, illetve fagy- és olvasztósóálló beton esetén az *1. ábrán* tetszőlegesen felvett m_N pont (②) az $x = n = \mathrm{N}$ függőlegesében elvileg az $Y = m = 0{,}0$ és az $Y = m = M_N$ pont között bárhol fekhet, tehát – egyéb előírás híján – az európai és a svájci szabvány szerint a lassulási feltétel független a vizsgálat végéhez tartozó összes megengedett (M_N) fagyasztási tömegveszteség értékétől, illetve a vizsgálat végéhez tartozó összes mért (m_N) és megengedett (M_N) fagyasztási tömegveszteség viszonyától (m_N/M_N), lásd az *1. táblázatban* a lassulási feltétel ❷ sorát.

Ennek értelmében az N/2 és N ciklusszámok között a fagyasztási hámlás folyamatának az európai és a svájci szabvány – e tekintetben szigorúbb előírása – szerint minden esetben lassulnia kell, a magyar szabvány – e tekintetben megengedőbb ajánlása – szerint pedig csak

1. táblázat: *Az európai, svájci és magyar szabványos hámlasztásos fagyasztási lassulási feltételek összevetése*

Lassulási feltétellel foglalkozó szabvány		MSZ EN 13877-2:2013	SN EN 206-1/NE:2013	MSZ 4798:2016 és MSZ 4798:2016/2M:2018
Fagyállósági osztály, amelyben a lassulási feltételnek szerepe van		FT2 osztály, amelyben a hámlási tömegveszteség mért átlagértéke 28 ciklus után: $m_{28} < 500$ g/m² és 56 ciklus után: $m_{56} < 1000$ g/m² kell legyen.	Igen fagy- és olvasztósóálló (lényegében XF4(CH) környezeti osztályú) beton, amely esetén a hámlási tömegveszteség mért átlagértéke 28 ciklus után: $m_{28} \leq 600$ g/m², és $m_{28} - m_{14} \leq m_{14}$, azaz 14 ciklus után: $m_{14} \geq 300$ g/m² kell legyen.	XF1, XF3, XF3(H), különösképpen: XF2, XF2(H), XF4, XF4(H) környezeti osztály
A lassulási feltétel alkalmazásának jellege		Előírás	Előírás az $m_{28} \leq 200$ g/m² követelmény alternatívájaként, ha $m_{28} \leq 600$ g/m²	Ajánlás
Lassulási feltétel	❶	$1{,}0 \leq m_{56}/m_{28} \leq 2{,}0$, azaz $1{,}0 \geq m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$	$1{,}0 \leq m_{28}/m_{14} \leq 2{,}0$, azaz $1{,}0 \geq m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$	$1{,}0 \geq m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$
	❷	–	–	$1{,}0 \geq m_N/M_N \geq 0{,}5$
A lassulási feltétel a vizsgálat végén mért (m_N) és megengedett (M_N) fagyasztási tömegveszteség viszonyától…		független		a következőképpen függ: $M_N \geq m_N \geq M_N/2$ (Ha $0 < m_N < M_N/2$, akkor a folyamat korlátlanul gyorsulhat.)
		Lásd e táblázat fenti, a lassulási feltétel ❷ sorát.		
Folyamat gyorsulása: $m_{N/2}/m_N < 0{,}5$		Nem megengedett	Nem megengedett	Nem megengedett, kivéve, ha $0 < m_N/M_N < 0{,}5$

akkor, ha $m_N \geq M_N/2$, azaz ellenkező esetben ($m_N < M_N/2$) a folyamat akár gyorsulhat is.

Elképzelésünk szerint a hámlasztásos fagyasztási lassulási feltétel – kiindulva az MSZ 4798:2016 és MSZ 4798:2016/2M:2018 szabvány szerinti feltételből – a szabványokon túlmenően továbbfejleszthető.

3. A SZABVÁNYOS HÁMLASZTÁSOS FAGYASZTÁSI LASSULÁSI FELTÉTEL TOVÁBBFEJLESZTÉSE

A szabványos hámlasztásos fagyasztási lassulási feltételt a határvonal függvényének átalakításával (transzformálásával) számtalan módon továbbfejleszthetjük, és ehhez az átalakítás célja megszabta feltételeket is rendelhetünk.

A szabványos lassulási feltétel átalakításának célja elképzelésünk szerint például legyen az, hogy

- a fagyasztási hámlásnak a közepesnél jobban ($0{,}0 < m_N/M_N < 0{,}5$) ellenálló fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállóság betonok szabványos fagyasztási lassulási követelményét, illetve ajánlását ellenállóképességük arányában mérsékeljük. E célkitűzés csak azokra a betonokra nézve értelmes, amelyek vizsgálati félidejében (az előírt összes ciklusszám felénél) mért összes átlagos tömegveszteség a fő-követelmény szerinti érték felénél kisebb ($2 \times m_{N/2}/M_N < 1{,}0$);
- a szabványos lassulási feltételt ($1{,}0 \geq m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$) – lásd az *1. táblázatbeli* lassulási feltétel ❶ sorát – olyan lassulási feltétel váltsa fel, amelynek értelmében a közepesnél jobb ellenállóképességű betonok vizsgálati hámlási folyamata mérsékelten gyorsulhat, és a mérsékelt gyorsulás a betonok fagy-, illetve fagy- és olvasztósóállósági hámlási ellenállása javulásának – az $m_{N/2}/m_N$ hányados csökkenésének – **arányában** korlátozott mértékben növekedhet.

E cél elérése érdekében a transzformálás feltételei legyenek a következők:

- a koordináta-rendszer kezdőpontját és az $x = n = N/2$ abszcissza érték függőlegesében lévő $y = m_{N/2}/M_N = 0{,}5$ ordináta pontot összekötő egyenes (egyenlete: $y = x/N$) koordináta-rendszerbeli helye maradjon változatlan. Az $y = x/N$ egyenes az $x = n = N$ abszcissza érték függőlegesét az $y = m_N/M_N = 1{,}0$ ordináta pontban metszi (*1. ábra*);
- valamennyi, a koordináta-rendszer kezdőpontján és az $x = n = N/2$ abszcissza érték függőlegesében lévő valamely $0{,}0 < m_{N/2}/M_N < 0{,}5$ ordináta ponton átmenő egyenes (egyenlete: $y = (2/N) \times (m_{N/2}/M_N) \times x$) a transzformáció után is az $m_{N/2}/M_N$ értéket vegye fel az $x = n = N/2$ abszcissza érték függőlegesében;
- az eredetileg koordináta-rendszer kezdőpontjában találkozó határvonal egyenesek a transzformáció után is egy pontban metsszék egymást, és ez a pont az $y = x/N$ egyenesen feküdjék, x és y koordinátái pedig $x = -N/2$ és $y = -0{,}5$ legyenek.

A feladat tehát az ($x_1 = -N/2$; $y_1 = -0{,}5$) és ($x_2 = N/2$; $y_2 = m_{N/2}/M_N$) pontokon átmenő egyenesek egyenletének felírása. **Két ponton átmenő egyenes esetén a következő összefüggésnek kell teljesülnie:**

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

Ellenőrzésképpen írjuk fel a két ponton átmenő egyenes összefüggését az *x'-y'* segéd koordináta-rendszerben is, amely esetén a transzformáció folytán $x' = x + N/2$ és $y' = y + 0{,}5$, és amelyben a szóban forgó két pont: ($x'_1 = 0$; $y'_1 = 0$) és ($x'_2 = N$; $y'_2 = (m_{N/2}/M_N) + 0{,}5$):

$$\frac{y' - y'_1}{y'_2 - y'_1} = \frac{x' - x'_1}{x'_2 - x'_1}$$

A megfelelő értékek behelyettesítése és az összefüggések rendezése után mind az *x-y* koordináta-rendszerben, mind az *x'-y'* segéd koordináta-rendszerben felírt összefüggés azonosan adja a transzformált határvonalak egyenesei függvénysorának egyenletét:

$$y = \frac{1}{N} \times \left(\frac{m_{N/2}}{M_N} + \frac{1}{2}\right) \times x + \frac{1}{2} \times \left(\frac{m_{N/2}}{M_N}\right) - \frac{1}{4}$$

Ezzel az egyenlettel meghatározott transzformált függvénysor egyeneseit az *x'–y'* segéd koordináta-rendszer alkalmazásával a *3. ábrán* szerkesztettük meg, és a szerkesztés eredményeképpen a fagyasztás hámlási folyamatának továbbfejlesztett lassulási határvonalait a *4. ábrán* rajzoltuk meg.

A transzformált függvénysor értékkészletét a *2. táblázatban* tüntettük fel. A fagyasztás hámlási folyamatának továbbfejlesztett lassulási határvonalaira a *2. táblázat* $m_{N/2}/M_N$, m_N/M_N és $m_{N/2}/m_N$ oszlopai vonatkoznak, a *2. táblázat y'* és *y* oszlopa pedig az *x'-y'* segéd koordináta-rendszer, illetve az *x-y* koordináta-rendszer ordinátájának adatait tartalmazza.

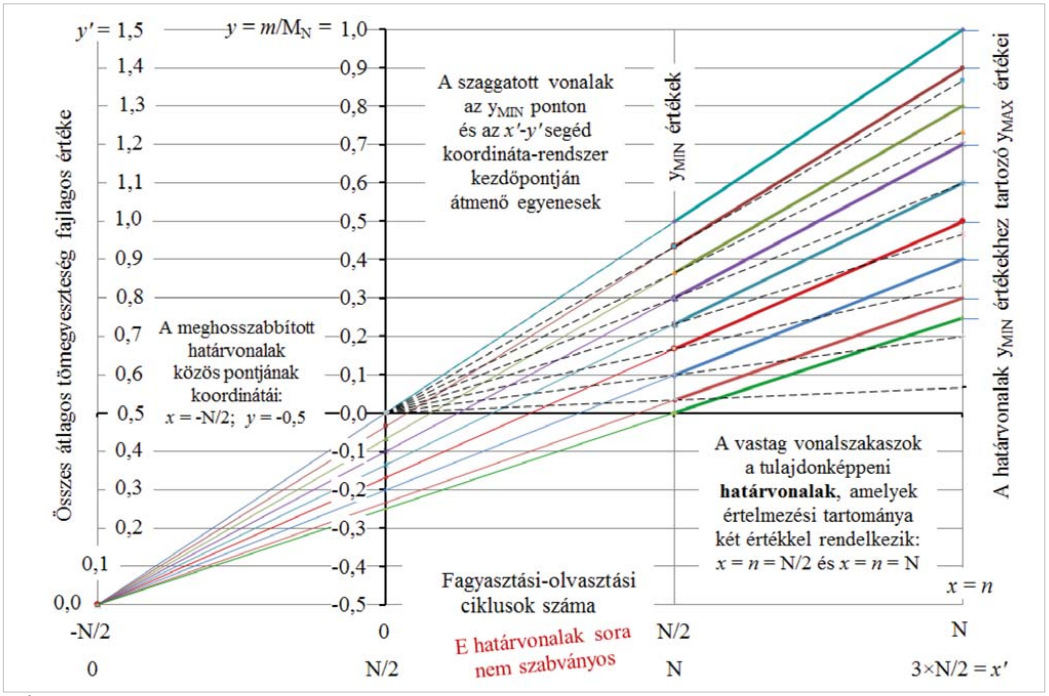
A *2. táblázat* első oszlopának adatai azt mutatják, hogy célkitűzésünknek megfelelően:

- a továbbfejlesztett határvonalak meghosszabbított egyenesei az $x = -N/2$ és $y = -0{,}5$ koordinátájú pontban metszik egymást;
- és a továbbfejlesztett határvonalaknak az y_{MAX} és y_{MIN} értékek viszonyával leírható meredeksége az $y_{MAX} - y_{MIN}$ különbségek, illetve az y_{MIN}/y_{MAX} hányadosok csökkenésével egymáshoz képest csökken, amely a hámlási folyamat korlátozott mértékű gyorsulása ezzel járó növekedésének elfogadását fejezi ki. Megjegyzendő, hogy az $y_{MAX} - y_{MIN}$ különbségek, illetve az y_{MIN}/y_{MAX} hányadosok csökkenése az $y_{MIN} = m_{N/2}/M_N$ hányados 0,5 értékről való csökkenésének folyománya.

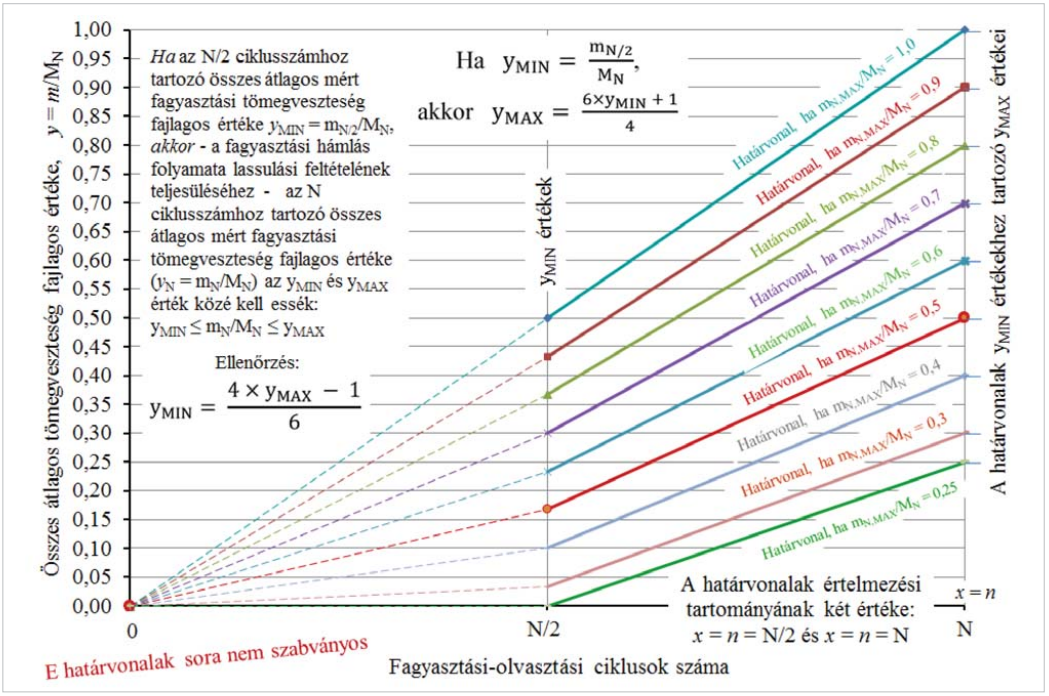
Térjünk röviden vissza az *1. ábrabeli* példához, amelyben az $y_{MIN} = 0{,}427$ értékű ① ($m_{N/2}/M_N$) pontból kiindulva az MSZ 4798:2016 szabvány lassulási feltétele szerint szerkesztett határvonal végpontjának ($2 \times m_{N/2}/M_N$) értéke $y_{MAX} = 0{,}854$. Ennek értelmében a vizsgálat félidejében (N/2 ciklusszámnál) mért $m_{N/2}/M_N = 0{,}427$ összes átlagos fajlagos tömegveszteség esetén a hámlási folyamat akkor lassul, ha a vizsgálat végén (N ciklusszámnál) mért az összes átlagos fajlagos tömegveszteség (m_N/M_N) az $y_{MIN} = m_{N/2}/M_N = 0{,}427$ és az $y_{MAX} = m_N/M_N = 0{,}854$ érték közé esik. Az *1. ábrabeli* hámlási görbe, amelynek a vizsgálat végéhez (N ciklusszámhoz) tartozó értéke $m_N/M_N = 0{,}659$ (az *1. ábrán* a ② pont), ezt a feltételt akkor is teljesítette volna, ha az m_N érték az $y_{MAX} = 0{,}854$ értéket elérte volna. (A szabványok *1. táblázatbeli* ❶ lassulási feltétele szerinti határvonalakat a *3. ábrán* szaggatott vonallal rajzoltuk meg.)

Ugyanakkor a transzformált határvonalak fenti egyenletével számolva a *2. táblázat* *-okkal jelölt sorában azt látjuk, hogy a továbbfejlesztett lassulási feltétel szerint az *1. ábrabeli* hámlási görbe **a szabványok előírását, illetve ajánlását meg**haladó módon még akkor is elfogadott („lassuló hámlási folyamatúnak tekintendő"), ha a vizsgálat végén (N ciklusszámnál) mért összes átlagos fajlagos tömegveszteség értéke $y_{MAX} = m_N/M_N = 0{,}891$.

Az átalakítás eredményeként kapott lassulási feltétel jellemzőit a magyar betonszabványok (MSZ 4798:2016, és MSZ 4798:2016/2M:2018) lassulási feltételének jellemzőivel a *3. táblázatban* vetettük össze. A *3. táblázatban* látni lehet, hogy a továbbfejlesztett lassulási feltétel



3. ábra: *A fagyasztás hámlási folyamata továbbfejlesztett lassulási határvonalainak szerkesztése segéd koordináta-rendszer (x′–y′) alkalmazásával*



4. ábra: *A fagyasztás hámlási folyamatának továbbfejlesztett lassulási határvonalai*

- mind az $n = N$ fagyasztási ciklusszámhoz tartozó, a lassulási feltételt kielégítő legnagyobb m_N, illetve m_N/M_N érték (Y_{MAX}, illetve y_{MAX}),
- mind a lassulási feltétel fogalma,
- mind alkalmazandósága, illetve alkalmazhatósága,
- mind a folyamat gyorsulásának elfogadása,
- mind a hámlási határvonal függvényének egyenlete

tekintetében a szabványos lassulási feltételnél árnyaltabb.

2. táblázat: A transzformált függvénysor értékkészlete

$x = n = -N/2$ $x' = 0$	$y = m/M_N$ értéke, ha			$m_{N,MAX}/M_N - m_{N/2}/M_N$	$m_{N/2}/m_{N,MAX}$
	$x = n = 0$ $x' = N/2$	$x = n = N/2$ $x' = N$	$x = n = N$ $x' = 3\times N/2$		
Segéd koordináta-rendszer ordináta-tengelye	Ordináta-tengely	$m_{N/2}/M_N$	$m_{N,MAX}/M_N$		
y'	y	y_{MIN}	y_{MAX}	$y_{MAX} - y_{MIN}$	y_{MIN}/y_{MAX}
-0,500	0,000	0,500	1,000	0,500	0,500
-0,500	-0,008	0,483	0,975	0,492	0,496
-0,500	-0,013	0,475	0,963	0,488	0,494
-0,500	-0,017	0,467	0,950	0,483	0,491
-0,500	-0,025	0,450	0,925	0,475	0,486
-0,500	-0,033	0,433	0,900	0,467	0,481
-0,500*	-0,037*	0,427*	0,891*	0,464*	0,480*
-0,500	-0,038	0,425	0,888	0,463	0,479
-0,500	-0,042	0,417	0,875	0,458	0,476
-0,500	-0,050	0,400	0,850	0,450	0,471
-0,500	-0,058	0,383	0,825	0,442	0,465
-0,500	-0,063	0,375	0,813	0,438	0,462
-0,500	-0,067	0,367	0,800	0,433	0,458
-0,500	-0,075	0,350	0,775	0,425	0,452
-0,500	-0,083	0,333	0,750	0,417	0,444
-0,500	-0,088	0,325	0,738	0,413	0,441
-0,500	-0,092	0,317	0,725	0,408	0,437
-0,500	-0,100	0,300	0,700	0,400	0,429
-0,500	-0,108	0,283	0,675	0,392	0,420
-0,500	-0,113	0,275	0,663	0,388	0,415
-0,500	-0,117	0,267	0,650	0,383	0,410
-0,500	-0,125	0,250	0,625	0,375	0,400
-0,500	-0,133	0,233	0,600	0,367	0,389
-0,500	-0,138	0,225	0,588	0,363	0,383
-0,500	-0,142	0,217	0,575	0,358	0,377
-0,500	-0,150	0,200	0,550	0,350	0,364
-0,500	-0,158	0,183	0,525	0,342	0,349
-0,500	-0,163	0,175	0,513	0,338	0,341
-0,500	-0,167	0,167	0,500	0,333	0,333
-0,500	-0,175	0,150	0,475	0,325	0,316
-0,500	-0,183	0,133	0,450	0,317	0,296
-0,500	-0,188	0,125	0,438	0,313	0,286
-0,500	-0,192	0,117	0,425	0,308	0,275
-0,500	-0,200	0,100	0,400	0,300	0,250
-0,500	-0,208	0,083	0,375	0,292	0,222
-0,500	-0,213	0,075	0,363	0,288	0,207
-0,500	-0,217	0,067	0,350	0,283	0,190
-0,500	-0,225	0,050	0,325	0,275	0,154
-0,500	-0,233	0,033	0,300	0,267	0,111
-0,500	-0,238	0,025	0,288	0,263	0,087
-0,500	-0,242	0,017	0,275	0,258	0,061
-0,500	-0,250	0,000	0,250	0,250	0,000

3. táblázat: *A magyar betonszabványok lassulási feltétele és a továbbfejlesztett lassulási feltétel összevetése*

Lassulási feltétel jellemzői	MSZ 4798:2016 és MSZ 4798:2016/2M:2018	Továbbfejlesztett lassulási feltétel
Fagyállósági osztály, amelyben a lassulási feltételnek szerepe van	XF1, XF3, XF3(H), különösképpen: XF2, XF2(H), XF4, XF4(H) környezeti osztály	
A lassulási feltétel alkalmazásának jellege	ajánlás	
Az n = N fagyasztási ciklusszámhoz tartozó, a lassulási feltételt kielégítő legnagyobb m_N, illetve m_N/M_N érték (Y_{MAX}, illetve y_{MAX})	$Y_{MAX} = 2 \times m_{N/2}$ $y_{MAX} = 2 \times \frac{m_{N/2}}{M_N}$	$Y_{MAX} = \frac{6 \times m_{N/2} + 1}{4}$ $y_{MAX} = \frac{6 \times \frac{m_{N/2}}{M_N} + 1}{4}$
Lassulási feltétel	$1{,}0 \geq m_{N/2}/m_N \geq 0{,}5$ ($1{,}0 \leq m_N/m_{N/2} \leq 2{,}0$)	A lassulási feltétel az y_{MIN} ($m_{N/2}/M_N$ hányados) és a határvonal szerint hozzá tartozó y_{MAX} ($m_{N,MAX}/M_N$ hányados) függvénye.
A lassulási feltétel alkalmazandósága, illetve alkalmazhatósága az m_N/M_N hányados függvényében	A lassulási feltétel az m_N/M_N hányados függvényében csak akkor alkalmazandó, ha $M_N/2 \leq m_N \leq M_N$, azaz $0{,}5 \leq m_N/M_N \leq 1{,}0$.	A lassulási feltétel a $0{,}0 < m_N/M_N < 1{,}0$ hányados nagyságától függetlenül alkalmazható.
Folyamat gyorsulása: $m_{N/2}/m_N < 0{,}5$	Nem megengedett, kivéve, ha $0{,}0 < m_N/M_N < 0{,}5$, azaz $0{,}0 < m_N < M_N/2$, amikor is a folyamat korlátlanul gyorsulhat.	A folyamat bármely $0{,}0 < m_N/M_N < 1{,}0$ hányados esetén korlátozottan gyorsulhat az y_{MIN} és y_{MAX} értékek meghatározta határvonal szerint.
A hámlási határvonal függvényének egyenlete	$y = \frac{2}{N} \times \frac{m_{N/2}}{M_N} \times x$	$y = \frac{1}{N} \times \left(\frac{m_{N/2}}{M_N} + \frac{1}{2}\right) \times x + \frac{1}{2} \times \left(\frac{m_{N/2}}{M_N}\right) - \frac{1}{4}$
Megjegyzés: Az n = N fagyasztási ciklusszámhoz tartozó, a lassulási feltételt kielégítő legnagyobb m_N, illetve m_N/M_N érték (Y_{MAX}, illetve y_{MAX}) az n = N/2 ciklusszámnál mért átlagos hámlási veszteség mért értékének ($Y_{MIN} = m_{N/2}$), illetve mért fajlagos értékének ($y_{MIN} = m_{N/2}/M_N$) a függvénye.		

Mind a szabványokon alapuló, mind a fenti továbbfejlesztett lassulási feltételekhez tartozó, az *1. – 4. ábrán* poligonként (folytonos vonallal rajzolt hisztogramként) ábrázolt határvonalak függvényének (hisztogramjának) értelmezési tartománya igen szegényes, hiszen e függvények (hisztogramok) diszkrét (nem folytonos, hanem megszámlálható tagú) független változójának ($x = n$) csak két értelmezhető tagja van, az $x = n$ = N/2 kezdő- és $x = n$ = N záróérték.

A fagyasztási hámlás folyamata lassulásának vagy gyorsulásának bizonyossága a határvonalak függvénye értelmezési tartományának bővítésével, az $x = n$ diszkrét független változó értelmezhető tagjai számának növelésével, azaz a hámlási veszteségek gyakoribb – például 7, esetleg 4 fagyasztási-olvasztási ciklusonkénti – mérésével növelhető.

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK, KÖVETKEZTETÉSEK

Cikkünkben a fagy-, illetve fagy- és olvasztósóálló betonok MSZ EN 138772:2013, SN EN 2061/NE:2013 és MSZ 4798:2016 szabványok bevezette hámlasztásos fagyasztási lassulási feltétellel, valamint a lassulási feltételnek e szabványokon túlmenő továbbfejlesztésével foglalkoztunk.

A lassulási feltétel alkalmazásának értelme, hogy általa a hámlasztásos fagyasztás-olvasztási ciklusok betonkárosító hatására nem csak a vizsgálat végeredménye, hanem a hámlási folyamatának jellege alapján is lehet következtetni.

A fagyasztási hámlás folyamatának leírásához értelmeztük a hámlasztásos fagyasztási lassulás fogalmát, bevezettük a határvonal fogalmát, és a szabványos hámlasztásos fagyasztási lassulás feltételét e határvonal függvényének átalakításával továbbfejlesztettük.

A továbbfejlesztett lassulási feltétel alkalmazhatósága a szabványos lassulási feltétel alkalmazhatóságánál szélesebb körű, és figyelembevétele a fagy, illetve fagy- és olvasztósóállóság-vizsgálati eredmények szabványos értékelésénél árnyaltabb értékelésre ad lehetőséget, amellyel élni főképp kutatási eredmények elemzése és gyakorlati hasznosíthatóságuk tanulmányozása során érdemes.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózinónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

6. ACKNOWLEDGEMENT

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

7. HIVATKOZOTT SZAKIRODALOM

Balázs L. Gy. – Kausay T. (2008), „Betonok fagy- és olvasztósóállóságának vizsgálata és követelmények – 1. Értelmezés”, *Vasbetonépítés,* X. évfolyam 2008/4. szám, pp. 127-135.

Balázs L. Gy. – Kausay T. (2009), „Betonok fagy- és olvasztósóállóságának vizsgálata és követelmények – 2. Vizsgálat”, *Vasbetonépítés,* XI. évfolyam 2009/2. szám, pp. 55-65.

Balázs L. Gy. – Kausay T. (2019), „Betontípusok, fogalmak, jelölések, újdonságok. Az MSZ 4798:2016, MSZ 4798:2016/1M:2017 és MSZ 4798:2016/2M:2018 betonszabvány néhány fejezetének értelmezése. 2. rész: Betonok szabványos jelölése, betontermék, bedolgozási konzisztencia, betontechnológiai munkamenetterv”, *Vasbetonépítés,* XXI. évfolyam 2019/4. szám, pp. 97-110.

8. HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK, MŰSZAKI SPECIFIKÁCIÓK

MSZ 4798:2016 „Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelőség, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon”

MSZ 4798:2016/2M:2018 „Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelőség, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon” Az MSZ 4798:2016 szabvány módosítása

MSZ EN 13877-2:2013 „Betonburkolatok. 2. rész: Betonburkolatok rendeltetésnek megfelelő követelményei”

MSZ CEN/TS 12390-9:2018 „A megszilárdult beton vizsgálata. 9. rész: Fagyállóság jégolvasztó sóval. Lehámlás” (Megjegyzés: A műszaki specifikáció alcíme két szempontból is félrevezető: egyrészt azért, mert a műszaki specifikáció szerint a fagyasztóközeg jégolvasztósó nélküli ionmentes víz is lehet; másrészt azért, mert a műszaki specifikációban az ún. kockavizsgálatot is tárgyalják, amellyel nem a felületi hámlás, hanem a térfogati mállás vizsgálandó.)

CEN/TS 12390-9:2006 „Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance. Scaling” Visszavont európai műszaki specifikáció

EN 2061:2000 „Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity”

EN 206:2013 „Concrete. Specification, performance, production and conformity”

SN EN 206-1/NE:2013 Beton. Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Nationale Elemente NE zur Norm SN EN 206-1:2000

Dr. Kausay Tibor (1934) okl. építőmérnök (1961), vasbetonépítési szakmérnök (1967), egyetemi doktor (1969), a műszaki tudomány kandidátusa (1978), Ph.D. (1997), címzetes egyetemi docens (1985), címzetes egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken (2003), a ***fib*** Magyar Tagozat tagja (2000), az MTA gróf Lónyay Menyhért emlékérmese (2003), a Palotás László-díj birtokosa (2015). Tevékenysége a betontechnológiai és a kő- és kavicsipari kutatásra, fejlesztésre, szakértésre, oktatásra, szabványosításra terjed ki. Publikációinak száma mintegy 220.

Dr. Nehme Salem Georges (1963) okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a beton porozitása, a betonok és öntömörödő betonok tartósságának összefüggése a porozitással, az öntömörödő betonok és acélszálas öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében, az öntömörödő betonok tömegbetonként történő alkalmazási problémainak megszüntetése. A Magyar Mérnöki Kamara (T1-01-9159), a ***fib*** Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

Dr. Balázs L. György (1958) okl. építőmérnök, mérnöki matematikai szakmérnök PhD, Dr. habil., egyetemi tanár, BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék. MTA műszaki tud. kandidátusa. Fő kutatási területei: beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), roncsolásmentes vizsgálatok. Speciális betonok és betétek: szálerősítésű betonok (FRC), nem acélanyagú (FRP) betétek, megerősítések anyagai és módjai, HPC, UHPC, LWC. Tűzállóságra való tervezés, tűzállóság fokozása. Fagyállóság fokozása. Kémiai ellenállóképesség fokozása. Tartósság. Használati élettartam. Fenntartható építés. Erőátadódás betonban, vasbeton tartók repedezettségi állapota. Fáradás. Lökésszerű terhelés. Nukleáris létesítmények. A ***fib*** (Nemzetközi Betonszövetség) elnöke (2011-2012), jelenleg tiszteletbeli elnöke. A ***fib*** Magyar Tagozat elnöke. Az Int. PhD Symp. in Civil Engineering alapítója. A ***fib*** Com 9 „Dissemination of knowledge” elnöke.

FREEZE-THAW RESISTANCE OF CONCRETE WITH DECREASING DEGRADATION RATE

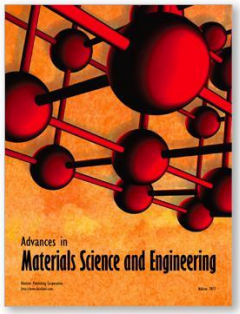
Tibor Kausay– Salem G. Nehme – György L. Balázs

Freeze-thaw resistance of concrete with or without deicing salts defined as scaling resistance is a long term process with increasing or decreasing tendencies which reached nowadays an increasing interest. The terminology: freeze-thaw resistance of concrete with decreasing degradation rate is itself a new terminology, we did not find a previous example of it.

Present paper has been developed as part of the results of the Hungarian Reasearch Grant Nr. NVKP 16-1-2016-0019 entitled “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”. Our intention was to define freeze-thaw resistance of concrete possible with decreasing degradation rates and to formulate its conditions.

PUBLIKÁCIÓK ÖSSZEFOGLALÓI COPY RIGHT MEGJELENÉS ESETÉN

Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements



Katalin Kopecskó, György L. Balázs

Abstract

Durability and service life of concrete structures can be endangered by chloride ions. Two phenomena help to keep control of chloride effects. On one hand cements are able to bind chloride ions by their aluminate clinker phases or by the clinker substituting materials. On the other hand resistivity of concrete against chloride penetration can be improved by careful selection of concrete constituents and production. Detailed results of two series of extensive experimental studies are presented herein. Chloride ion binding capacity of tested cements in decreasing sequence was the following: (1) CEM III/B 32,5 N-S; (2) CEM III/A 32,5 N; (3) CEM II/B 32,5 R; (4) CEM II/B-M (V-L) 32,5 R; (5) CEM I 42,5 N. Test results indicated that the increasing substitution of clinkers by GGBS improves the chloride resistivity in concrete made with the same water to cement ratio.The application of air entraining agent increases considerably the values of *D*nssm. Based on the migration coefficients (*D*nssm) the following sequence of efficiency was found (from the best): CEM III/B 32,5 N > CEM V/A (S-V) 32,5 N > CEM III/A 32,5 N > CEM II/B-S 42,5 R > CEM II/A-S 42,5 N > CEM I 42,5 N.

Acknowledgments

The authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP 16-1-0019 “Development of Concrete Products with Improved Resistance to Chemical Corrosion, Fire or Freeze-Thaw.”

K. Kopecskó, Gy. L. Balázs, Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2017, Article ID 7940247, 13 pages, https://doi.org/10.1155/2017/7940247

CT analysis of core samples from fire-damaged concrete structures

Éva Lublóy, Kristóf Kapitány, György L. Balázs, Árpád Barsi



Abstract

Fire can cause damage in structures. The level of damage depends on several factors, such as maximal temperature, duration of fire, constituents of the concrete and so on. It is necessary to design fire-resistant buildings and deal with possible reconstruction after fire. For the reconstruction, it is important to determine the level of damage and the necessary steps to take following the fire. This study investigates the possibilities and limitations of non-destructive test methods for fire-affected concrete structures by computed tomography (CT). For demonstration of the applicability of CT measurements, two cases are presented: (a) a 2 h fire test of a tunnel element and (b) a 1:1 scale fire test of a reinforced concrete building. CT analyses were carried out on samples. Considerable reduction of porosity was observed towards the concrete surface that was subjected to fire. The results of CT analyses agree well with the human observations of changing colours from gray to pink.

Acknowledgments

The authors acknowledge the support by the Hungarian research grant NVKP_16-1-0019 ‘Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze–thaw’.

É. Lublóy, K. Kapitány, Gy. L. Balázs, Á. Barsi, CT analysis of core samples from fire-damaged concrete structures, Magazine of Concrete Research, Paper 1600490, http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.16.00490

Fire Resistance of Concretes with Blended Cements

György L. Balázs, Katalin Kopecskó, Naser Alimrani,
Nabil Abdelmelek, Éva Lublóy



Abstract

An extensive experimental study has been carried out to analyse the post-heating characteristics of concrete subjected to high temperatures up to 800 °C. Major parameters of our study were the type and amount of supplementary cementitious materials (slag, fly ash, trass, silica fume, metakaolin) in cements and the level of maximum temperature (50, 150, 300, 500 or 800 °C). Present study includes analyses of surface cracking and residual compressive strength.

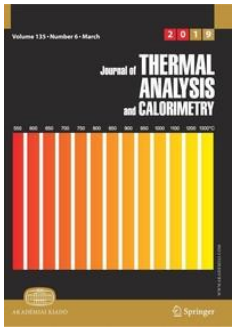
Our observations indicated that the most intensive surface cracking was observed by using Portland cement without addition of supplementary materials. The increasing contents of the supplementary material of cement influence differently the relative post-heating compressive strength. Tendencies of surface cracking and reduction of compressive strength were in agreement, i.e. the more surface cracks, the more strength reduction has been observed.

Acknowledgments

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

Balázs G.L., Kopecskó K., Alimrani N., Abdelmelek N., Lublóy É. (2018) Fire Resistance of Concretes with Blended Cements. In: Hordijk D., Luković M. (eds) High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_163

Improved fire resistance by using Portland-pozzolana or Portland-fly ash cements



Éva Lublóy, Katalin Kopecskó, György L. Balázs, Ágoston Restás, Imre M. Szilágyi

Abstract

Our study was directed to the analysis of the influence of various types of cements on the behaviour of concrete at high temperatures. In our experiments binary blended and ordinary Portland cements were involved: two Portland cements with different clinker compositions and Portland cements containing pozzolanic additives as replacement of clinkers. In the first part of the study we focused on the influence of cement types where cement paste specimens were investigated. Then, based on the results of cement paste specimens, concretes specimens were prepared with some selected types of cements. Most important observation of our experimental study was that the pozzolanic additives and their increased amount have a favourable effect on the heat resistance (fire resistance) properties of concrete.

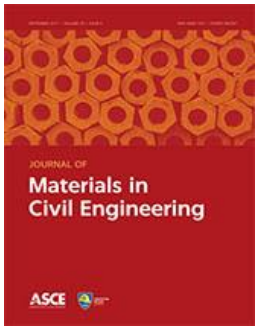
Acknowledgments

An OTKA-PD-109129 Grant is acknowledged. I. M. S. thanks for a János Bolyai Research Fellowship of the Hungarian Academy of Sciences. Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze–thaw”.

É. Lublóy, K. Kopecskó, Gy. L. Balázs, Á. Restás, I. M. Szilágyi, Improved fire resistance by using Portland-pozzolana or Portland-fly ash cements, J Therm Anal Calorim (2017) 129:925–936, https://doi.org/10.1007/s10973-017-6245-0

Evaluation of Concrete Elements with X-Ray Computed Tomography

György L. Balázs; Éva Lublóy; Tamás Földes



Abstract

Nowadays X-ray computed tomography (CT) imaging is being applied in the field of structural engineering. Scanning a concrete specimen by using X-ray tomography provides an insight into the inner structure without the need to destroy the specimen. As an example, the internal structure of cement-based materials is of high importance for understanding and modeling the transport phenomena that influence its durability. Some methods have been applied to observe and quantify the size and distribution of aggregate and cracks. In this study we would like demonstrate some examples of the potential of X-ray CT to study the three-dimensional evaluation of concrete structures and building material. Based on the technical potential of medical CTwe believe that our studies provide enough indication for the successful use of CT for concrete and concrete elements to determine aggregate size and distribution, pore or void size and distribution, deterioration due to freezethaw cycles and porosity, level of deterioration of concrete due to fire, and level of deterioration of steel prestressing wires due to corrosion.

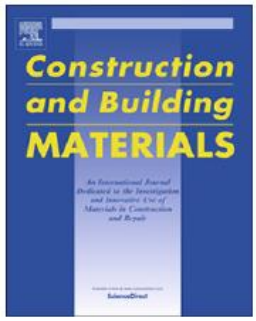
Acknowledgments

The authors acknowledge the support of Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw.” This was also supported by the János Bolyai research scholarship of the Hungarian Academy of Sciences.

Gy. L. Balázs; É. Lublóy; T. Földes, Evaluation of Concrete Elements with X-Ray Computed Tomography, J. Mater. Civ. Eng., 2018, 30(9): 06018010, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002389

CT and laboratory test of the wall panels after fire load

Éva Lublóy, Kristóf Kapitány, György L. Balázs, Tamás Földes, Viktor Hlavička, Lili Hlavicka-Laczák



Abstract

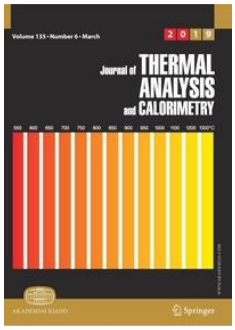
Nowadays prefabricated elements are typically made of highstrength concrete. In case of fire load, in addition to chemical and physical changes, spalling (detachment of layers) of the concrete surface may occur. This is especially true for the high-strength concrete. Based on our previous examinations we stated that computed tomography (CT) provides a good opportunity to test the fire-damaged buildings. However, the question is whether this method can be applied even if spalling of the concrete surface is caused by fire. Fire load tests were carried out on small elements (concrete cubes and blocks) and on full-scale wall panels, then results of these tests were compared. Beside the CT tests, laboratory tests were also carried out. Results of the tests were analysed and compared and by this we validated the correctness and applicability of the CT examinations.

Acknowledgments

This research was carried out with the support of the Bolyai János and the Bolyai + Higher Education Scholarships of Instructors and Young Researchers (ÚNKP-18-4). The research was also supported by the Higher Education Institutional Excellence Program, under the topic program of the BME FIKP-WATER, announced by the Ministry of Human Resources. Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-0019 ‘‘Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

É. Lublóy, K. Kapitány, Gy. L. Balázs, T. Földes, V. Hlavička, L. Hlavicka-Laczák, CT and laboratory test of the wall panels after fire load, Construction and Building Materials 211 (2019) 1105–1116, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.148

The impact of time on the heat resistance of self-compacting highperformance concrete incorporated with recycled martials



Mohammed Abed, Rita Nemes, Éva Lublóy

Abstract

The influence of time on the mechanical behavior of concrete after exposure to elevated temperatures has been studied. Twenty-one self-compacting high-performance concrete mixtures with different incorporation amounts of coarse recycled concrete aggregate (RCA) and three unprocessed waste powder materials have been tested at age of 270 days for residual compressive and flexural strength after exposure to fire. The results have been compared to the results for the same concrete, which have been studied at age of 90 days. A new parameter has been introduced for comparing the responses of concrete to elevated temperatures at different ages; this parameter was the ‘‘heat resistance’’ which expresses the total area under the curve of the relative residual strength (compressive or flexural) after exposing to six temperature degrees (20, 150, 300, 500, 600, and 800 °C). The results showed that the age of concrete has an influence on the response of concrete to elevated temperatures. The heat resistance of compressive strength enhanced with age but the concrete behaved with a tendency different to that at the age of 90 days. The heat resistance of flexural strength has not been affected or slightly decreased but not with more than 10% to that at the age of 90 days. The used waste powder materials were unprocessed waste fly ash, waste cellular concrete powder and waste perlite powder; they proved that using any of them up to 15% as a replacement for cement with 0% or 25% of RCA enhanced the concrete resistance for the fire with time. The main two reasons for changing of residual strength with the time were the changing of water content and the proceeding of hydration of the binder. In general, long ages testing properties of concrete simulate the real behavior of concrete structures accurately.

Acknowledgments

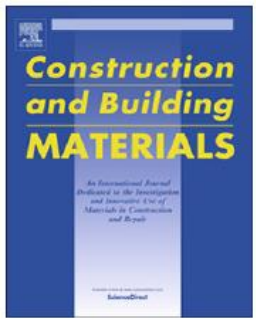
Open access funding provided by Budapest University of Technology and Economics (BME). Authors are grateful to the Hungarian Scientific Research Fund (OTKA) for the financial

support of the OTKA K 109233 research project, and support of Grant BME FIKP-VÍZ by EMMI is kindly acknowledged. The authors also acknowledge the support by the Ja´nos Bolyai Research Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences and ÚNKP-18-4 Scholarship.

M. Abed, R. Nemes, É. Lublóy, The impact of time on the heat resistance of self-compacting highperformance concrete incorporated with recycled martials, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2019) 138:35–45, https://doi.org/10.1007/s10973-019-08263-z

Classification of aggregates for fire

András Biró, Éva Lublóy



Abstract

The quality of the natural stone aggregates change with each shipment and it greatly influences the fireperformance of the concrete. For this reason, it would be advantageous if there would be a classification system for aggregates for fire or fire-related temperatures. The classification of the aggregate itself instead of the concrete could be faster and more economical solution in the long run, it could prevent the need to deconstruct concrete based on 28-day test results in case of an insufficient aggregate. This study aims to provide preliminary measurements and conclusions for such a system based on the Hummel-tests after heat loading with supplementary tests such as scanning electron microscope and derivatograph to better understand the changes of the inner structure. For this study quartz, crushed andesite and crushed limestone were tested. The Hummel tests were evaluated based the changes of the grain size distribution and showed promising results, but further testing is required with more samples to calibrate and to confirm the usability of the method.

Acknowledgments

The authors of the paper thank for the support of the research fund received through the project NVKP_16-1-0019 ‘‘Materials and Experimental Development of Concrete Products with High Resistance (Chemical Corrosion, Refractory and Antifreeze)”. The research reported in this paper was supported by the Higher Education Excellence Program of the Ministry of Human Capacities in the frame of the Water sciences & Disaster Prevention research area of the Budapest University of Technology and Economics (BME FIKP-VÍZ). The authors thank the support of the GINOP-2.1.2-8-1-4-16 research fund.

A. Biró and É.Lublóy, Classification of aggregates for fire, Construction and Building Materials, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121024

Effect of steel fibres on concrete at different temperatures in terms of shear failure



Naser S. Alimrani, György L. Balázs

Abstract

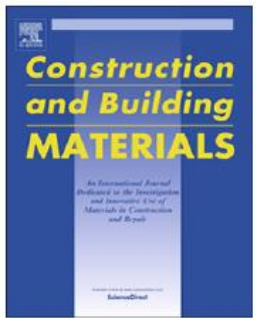
This paper experimentally investigated the behaviour of concrete at elevated temperatures in terms of shear deterioration using steel fibres. Forty five specimens of push-off model were used in which three samples for each category of maximum temperatures. Five maximum temperatures have been investigated i.e. 20, 150, 300, 500 and 700 °C. The main objective of this research is to investigate the effect of steel fibres on the behaviour of concrete at different maximum temperatures in terms of shear failure. This study showed the enhanced ductility and strength of the shear at elevated temperatures. Three main categories have been tested: plain concrete, steel fibre contents of 40 kg/m³ or 80 kg/m³. In addition, both crack width and crack slip have been measured using means of linear variable differential transducers (LVDTs). Results showed that the content of steel fibres increases the shear strength at ambient temperature by 103% and 102% for both SFRC-40 and SFRC-80, respectively. Although this enhancement is less important at high temperatures, i.e., 500 and 700 °C, still the mixes that contain fibres have higher residual shear strengths than plain mixes. Moreover, steel fibres content is affecting ductility in both ambient and high temperatures.

Acknowledgments

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 ‘‘Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freezethaw”.

N. S. Alimrani, Gy. L. Balazs, Effect of steel fibres on concrete at different temperatures in terms of shear failure, Magazine of Concrete Research (2020), https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00479

Investigations of direct shear of one-year old SFRC after exposed to elevated temperatures



Naser S. Alimrani, György L. Balázs

Abstract

Shear investigations are important in concrete due to the nature of brittle failure of shear. Moreover, concrete structures are more prone to shear failure in case of elevated temperatures. An experimental program has been investigated herein using different amounts of steel fibres, i.e., 0, 40 and 80 kg/m3. This study is part of overall study for the PhD degree. The first phase was to test push-off specimens at 28- days. At the current study, a total of 45 push-off specimens were tested at the age of one-year after exposure to different levels of max temperatures, i.e., 20, 15, 300, 500 or 700 C. The test is carried out at coldstate. Three LVDTs were used to measure crack slip as well as crack width. Results showed significant improvements in shear strengths as well as shear toughness by fibre content at ambient and less degree at elevated temperatures. Furthermore, crack width had generally more stiffness than crack slip, yet both fibre content and elevated temperature decrease the stiffness.

Acknowledgments

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 ‘‘Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freezethaw”.

N. S. Alimrani, Gy. L. Balazs, Investigations of direct shear of one-year old SFRC after exposed to elevated temperatures, Construction and Building Materials 254 (2020), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119308

Synthetic fibres or fibre cocktail in terms of shear capacity of concrete after elevated temperatures



Naser S. Alimrani, György L. Balázs

Abstract

Elevated temperatures can substantially affect the shear capacity of concrete. Herein we examine the effect of using different types of fibres on the behaviour of concrete at different maximum temperatures in terms of shear failure. The experiments were carried out by testing thirty specimens using two types of fibres at the age of 28 days. The study has adopted the push-off model for testing, which has been widely used as a relatively small, inexpensive, easy to perform and no need for special equipment, using either synthetic fibres or fibre cocktail. In addition, both crack width and crack slip have been investigated using LVDTs in both directions. The shear tests have been carried out at cold state after exposure to different levels of elevated temperatures. Using a bicomponent synthetic fibre with 4 kg/m³ approved to enhance the concrete ductility and toughness. However, using cocktail fibres, containing both synthetic fibres of 2 kg/m³ and steel fibres of 40 kg/m³, showed higher values than using synthetic fibres in terms of shear. Finally, mixes containing fibre cocktail showed more ductile behaviour than mixes with synthetic fibres at low as well as high temperatures.

Acknowledgments

Authors acknowledge the support by the Hungarian Research GrantNVKP_16-1-2016-0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

N. S. Alimrani∗, Gy. L. Balazs, Synthetic fibres or fibre cocktail in terms of shear capacity of concrete after elevated temperatures, Mechanics of Materials 148 (2020), https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103504

The effect of macrostructure and stability on the flammability of non-woven fabrics

Journal of Industrial Textiles

Zsuzsanna Kerekes, Katalin Kopecskó, Éva Lublóy, János Szép

Abstract

The most flame retardants and non-combustible non-woven fabrics are made of oxidized and carbon fibres due to their strong thermal stability. The burning of non-woven fabrics consists of complex combustion mechanisms: their surface, micro and macrostructures together define their combustion features. By microstructure, we mean oxidized polyacrylicnitrile fibres, which finally constitute the base material of the macrostructure. The macrostructure represents the different forms of the product, in which the material results during production. In this paper, the effect of the macrostructure of non-woven fabrics on flammability has been studied. It has experimentally shown that by defining the oxygen index, we can demonstrate the surface and thickness inhomogeneity, which is invisible or cannot be detected by mechanical tests. A feature of non-combustible non-woven fabrics is that their flammability depends on their thickness and area weight; however, the combustion phenomena of felt fabrics depend primarily on their macrostructure. Different oxygen contents have different combustion phenomena, thus an oxygen index can be assigned to each one. Thermoanalytical test results clearly showed the temperature at which the thermal decomposition of the fibres begins, which gives the surface flame when combusted.

Acknowledgments

The authors disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: Authors acknowledge the support for the purchase and use of scanning electron microscope by the Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016- 16 Journal of Industrial Textiles 0(0) 0019 “Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

Zs. Kerekes, K. Kopecskó, É. Lublóy, J. Szép, The effect of macrostructure and stability on the flammability of non-woven fabrics, Journal of Industrial Textiles, https://doi.org/10.1177/1528083720908803

PhD DISSZERTÁCIÓK

Green Self-compacting High-performance Concrete

(PhD disszertáció, 2019)

Mohammed A. ABED

Konzulensek: Dr. Nemes Rita

Summary

The work presented in this thesis deals with the development of a green version of self-compacting high-performance concrete (SCHPC) and studies its life from cradle to cradle. The SCHPCs were produced by the incorporation of coarse recycled concrete aggregate (RCA) as a partial replacement of coarse natural aggregate (NA) and/or of three unprocessed waste powder materials as cement replacement materials (CRMs). The three CRMs were waste fly ash (WFA), waste perlite powder (WPP) and waste cellular concrete (WCC). The RCA was in the range of 0% to 50% of NA by mass, whereas the CRMs were in the range of 0% to 30% of cement by mass. At the early stage, the replacement range has been determined; for aggregate by investigating the literature, while for cement by studying a number of binder pastes, which prepared and tested for the activation index. SCHPCs were tested for their fresh, mechanical, and durability properties in addition to fire resistance. Slump flow table and V-funnel tests were conducted for characterising the fresh state. Compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity were the evaluated mechanical properties. In addition, durability properties were investigated through water absorption, water penetration, chloride migration and freeze/thaw testes. The residual mechanical strengths were evaluated after exposure to elevated temperatures reaching 800 °C. The mechanical and durability properties have been tested at ages of 28, 90 and 270 days. The testing of long age properties giave represntitive performance of the CRMs where the effect of the CRMs could be increasingly significant and such problems as fire resistance could reflect real-world situations in existing buildings. However, SCHPC proved that is one of the favorable choices for utilizing waste materials, where the main findings of this Ph.D. thesis were as follows. The rubble of the produced SCHPC after testing was used for studying the multiple recycled concrete aggregate (MRCA) and multiple recycled aggregate concrete (MRAC). Replacement of NA by RCA or MRCA up to 50% enhanced the mechanical properties and microstructure of MRAC, but no general relationship was identified between the mechanical properties of SCHPC and its crushed aggregate, but a strong one was observed between the properties of MRCA and the

percentage of replacement of NA by RCA in its parent concrete. The use of WPP up to 15% with or without RCA and the use of WFA up to 15% with RCA could enhance the mechanical properties, durability properties and fire resistance of SCHPC and allow for the production of a sustainable product that is based on locally produced waste materials and can bear exposure to intense conditions.

Acknowledgement

I am grateful for the Hungarian Government for their awarding me with the 'Stipendium Hungaricum' scholarship.

I would like to express my sincere gratitude to my supervisor, Associate Professor Dr. Rita Nemes, for her guidance and support throughout my study.

Many thanks for Budapest University of Technology and Economics (BME), Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Materials and Technologies, with the head of department Dr. György Mihály Stocker.

I would like to extend my appreciation to Dr. Bassam Tayeh, Dr. Éva Lublóy and Dr. Tamás Károly Simon, Dr. Salem Nehme, Prof. György L. Balázs, Dr. Abdul Kader El Mir and Dr. János Madarász whom I got a lot of recommendations, advices and assistance along the way

Finally thanks a lot for András Pollák (Széchenyi István University), Tamás Földes (University of Pécs) and CRH Magyarország Kft. Rákospalota Concrete Plant for their offering their labs for conducting the frost scaling test. As well as for both NVKP_16-0019 project and fib Hungarian group

Szálerősítésű, illetve hőkárosodott betonok tulajdonságainak hatása a húzott rögzítőelemek viselkedésére

(PhD disszertáció, 2019)

Hlavička Viktor

Konzulensek: Dr. Lublóy Éva

Összefoglalás

A disszertációmban szálerősítésű, illetve hőkárosodott betonokban elhelyezett rögzítőelemeket vizsgáltam. Mindkét betontípus vizsgálata aktuális probléma, mivel a szálerősítés kiemelten fejlődő alkalmazási irány, a szerkezetek hőkárosodást követő megerősítése pedig hangsúlyos méretezési kérdés. Doktori kutatásom során célom volt olyan nem szokványos betonokban elhelyezett rögzítőelemek viselkedésének elemzése, amikre nem térnek ki a méretezési eljárások és szabványok. Törekedtem arra, hogy kihangsúlyozzak olyan, a szokványos betonoktól eltérő tulajdonságokat és paramétereket, amik hatással vannak a rögzítőelemek teherbírására és tönkremeneteli módjaira, bővítve ezzel a nem szokványos betonokban elhelyezett rögzítőelemek méretezési ismereteit. Következtetéseimet nagy számú saját laboratóriumi teszt, numerikus hőtechnikai analízis, illetve a szakirodalomban talált méretezési formulák elemzése alapján vontam le.

Értekezésem során rávilágítottam arra, hogy szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítések esetén azonos acélszál adagolás mellett a rövidebb és vékonyabb szálak jelentősen nagyobb hatással vannak a húzási teherbírás növekedésére, mint a hosszabb és vastagabb szálak. További eredményeim alapján kimutattam, hogy műanyag szál vizsgált adagolása esetén ugyanazok a teherbírási képletek használhatók az 50 mm rögzítési mélységben elhelyezett rögzítések teherbírásának számítására, mint a szokványos betonokban elhelyezett rögzítéseknél, mivel a vizsgált makroszálaknak nincs hatása a teherbírásra.

Kutatásom során igazoltam, hogy létre tud jönni a kívánt tapadás a hőkárosodott beton és az epoxi, illetve vinilészter-hibrid ragasztó között, így ezek a rögzítések alkalmasak a hőkárosodott betonban való használatra. Értekezésem felhívja a figyelmet arra, hogy a hagyományos, széles körben alkalmazott, CC-Method által javasolt formula nem alkalmas a hőkárosodott betonban elhelyezett rögzítések kúpszerű kiszakadásához tartozó teherbírásának

meghatározására, mivel a képlet a beton nyomószilárdságát veszi alapul, ami kevésbé érzékeny a magas hőmérséklet hatására, mint a húzószilárdság. Eredményeim alapján kidolgozásra került egy csökkentő szorzótényezős eljárás, aminek segítségével a hőterhelés jellegéből és a rögzítési mélységből meghatározható a rögzítés teherbírása hőkárosodott betonban. Az eljárást nagy számú saját és irodalmi kísérleti eredmény alapján validáltam.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm továbbá az alábbi pályázatoknak, ösztöndíjaknak és projekteknek, hogy közvetlenül vagy közvetve támogatták tudományos munkám elkészülését:

- Dr. Gallus Rehm Alapítvány pályázatai
- Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-18-3) doktorjelölti pályázat
- Tempusz Közalapítvány Campus Mundi pályázat
- NVKP_16-1-2016-0019: Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló, fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése
- FIKP VKT12: Tűz és robbanás hatása mérnöki létesítményekre, égésgátlás
- FIKP VKT11: Nukleáris létesítmények tervezése extrém hatásokra

Shear performance of concrete exposed to elevated temperatures

(PhD disszertáció, 2020)

Naser S. Alimrani
Konzulensek: Dr. Balázs L. György

Summary

Shear failure is considered as one of the most critical topics in reinforced concrete structures. In general, shear failure happens with little warning signs and is characterized by brittle nature. Comprehensive understanding of the shear behaviour of concrete structures is of great importance at room temperature. This question is even more complex at high temperatures.

Push-off is one of the most typical models that is used to test shear capacity. The push-off model is a non-standard and even in this case widely used test. Fibre-Reinforced Concrete (FRC) is widely used material as well. Numerous researches showed that deformation capacity and toughness of FRC are increased as a consequence of the bridging effect of the fibres, helping to resist the opening of cracks. Therefore, using FRC to enhance the shear behaviour of concrete could have promising results. In addition, incorporating the parameter of high temperatures on the study was of great importance.

I have chosen four main parameters to be investigated in the current study, namely: type of fibres, amount of fibres, maximum temperature, and age of concrete at testing time. Accordingly, five concrete mixes, depending on fibres content, were chosen as well as five maximum temperatures. In addition to, concrete is tested at two different ages; (I) 28-days and (II) one-year age. Push-off test setup is designed to measure the deformations occurred at the shear surface plane using means of Linear Variable Differential Transformers (LVDTs). LVDTs were used to measure two different deformations, i.e., relative displacement parallel to the load considered as crack slip, and relative displacement perpendicular to the load considered as crack width.

An extensive experimental study has been carried out to investigate the shear performance according to above parameters. The tests include compressive and flexural-tensile tests as well. Moreover, several approaches have been used to identify different properties of shear such as shear toughness, shear stiffness and shear failure modes. Finally, the current study could be considered as a major study for several future studies regarding the relevant topics, in which

some parameters have not been included herein such as size-effect of the push-off specimens, further types of fibres used, and different models for shear testing.

Finally, the overall aim of the current study is to evaluate the shear performance of concrete using different types and amounts of fibres in the case of elevated temperatures. To fulfil the targeted aim, the following objectives were performed:

1. To evaluate the influence of fibres with different types and ratios on shear strength at different maximum levels of temperatures.
2. To evaluate the influence of fibres with different types and ratios on shear toughness at different maximum levels of temperatures.
3. To evaluate the influence of fibres with different types and ratios on shear stiffness at different maximum levels of temperatures.
4. To specify the different shear failure modes of the push-off specimens at elevated temperatures regarding FRC.

Acknowledgement

I would first like to thank the Hungarian Government that granted me the Stipendium Hungaricum Scholarship in cooperation with the Palestinian Ministry of Higher Education. I am thankful also for Budapest University of Technology and Economics that accepted me to join them as a PhD student. In addition, I would like to thank Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 ”Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

DIPLOMAMUNKÁK, SZAKDOLGOZATOK

A beton teljesítőképességének növelése cementkiegészítő anyagokkal

(Diplomamunka, 2018)

Kiss Ferenc

Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

Vasbeton szerkezetek körében az egyik legáltalánosabb tönkremeneteli ok az acélbetét korróziója. Ez a korrózió létrejöhet két módon: kémiai korrózióval - a beton karbonátosodása következtében, és elektrokémiai korrózióval – a kloridion behatolás miatt. A kutatás során arra kerestem választ, hogyan változik egy éves vizsgálati időtartam során habarcsokban a kloridion behatolás mértéke eltérő cementkiegészítő anyagok (együttes) felhasználása esetén.

Az elvégzett szakirodalmi kutatómunka során komplex képet kaptam a témához kötődő vizsgálati módszerekről, megismertem a cementkiegészítő anyagok működési mechanizmusait, és szakirodalmi kutatási eredmények alapján kialakult bennem egy előzetes várakozás a felhasznált anyagok viselkedése kapcsán.

Feladatom a különböző cementkiegészítő anyagok hosszútávú hatásának vizsgálata a beton teljesítőképességére nézve. A vizsgálatokat egy éves korú próbatesteken végeztem. A próbatestek az NVKP_16-1-2016-0019 számú kutatási projekt keretében készültek. A kutatáshoz kapcsolódó, 7, 28, 56 és 90 napos korban végzett vizsgálati adatok birtokában kezdhettem el a laboratóriumi vizsgálatokat. Szakdolgozatom során négy cementkiegészítő anyag hatásait vizsgáltam, a Centrilit NC és Metaver N típusú metakaolinokat, Microsit 20 típusú kőszénpernyét és Centrilit Fume SX szilikapor szuszpenziót.

A mérések elvégzéséhez előzetesen ütemezést készítettem. Egyéves korban megvizsgáltam a keverékek hajlító-húzó és nyomószilárdságát, így meg tudtam határozni az egyes minták szilárdsági értékeinek változását a vizsgált időtartamban.

Vizsgáltam az anyagok hidrotechnikai tulajdonságait, teljes elmerítéses vizsgálat során meghatároztam a vízfelvételt tömegszázalékban megadva, az eredmények segítségével ki tudtam számítani az egyes minták testsűrűségét és látszólagos porozitását. Kapilláris vízfelvétellel a vízfelvételi együtthatót határozhattam meg.

Meghatároztam a beton pH értékét, végül gyorsított kloridmigrációs (HTC) vizsgálatot végeztem különböző összetételű mintákon. A kötött és szabad kloridion tartalmat kémiai analitikai módszerekkel határoztuk meg.

Az adatok kiértékelése során az alábbi következtetésekre jutottam:

- a Centilit NC metakaolin 90 napos korára kifejti teljesítőképesség javító hatásának nagy részét, az ezt követő időszakban már csak mérsékelt fejlődés érhető el;
- Metaver N metakaolin esetében még 90 napos kor után is jelentős változások következnek be a habarcsok anyag- és pórusszerkezetében;
- A Microsit 20 szűrt kőszénpernye 10%-os adagolása a legkedvezőbb, ennél nagyobb kiegészítőanyag tartalom csak mérsékelten javítja, bizonyos esetekben pedig rontja az eredményeket;
- Metakaolinok szilikaporral kombinált alkalmazása kedvezőbb eredményt biztosít, mintha ezt a mennyiséget csak metakaolinból fedeznénk.

Megállapítható végül, hogy a cementkiegészítő anyagok megfelelő arányban történő alkalmazása jelentősen képes javítani a beton teljesítőképességén szilárdsági, vízfelvételi és kloridion behatolási szempontból vizsgálva egyaránt.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy a kísérleti munkámhoz szükséges laboratóriumi és személyi hátteret biztosította.

Köszönöm a tanszék munkatársainak áldozatos munkájukat és segítségüket, Rónaky Viktóriának, Takács Krisztiánnak, Kováts Marcellnak és Csanády Dánielnek.

Köszönetet mondok az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül nyújtott kutatási támogatásért.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Kopecskó Katalinnak és Dr. Balázs L. Györgynek, akik konzultációink során hasznos tanácsokkal láttak el a szakdolgozatom készítése terén.

Előre gyártott betonok fagyállóságának fokozása kohósalakos cementtel, mint kiegészítőanyaggal

(Diplomamunka, 2018)

Szabó Vendel

Konzulensek: Dr. Nehme Salem Georges, Jakab András, Dr. Fehérvári Sándor

Összefoglalás

Diplomamunkám keretein belül az előre gyártott betonok fagyállóságának növelésével foglalkoztam. A kutatásom fő irányát a betonokhoz mint kiegészítőanyag hozzáadott kohósalakos cement vizsgálata adta.

A kutatásom célja, hogy olyan betonreceptúrákat állítsak elő, melyek ellenállnak a fagykárosodás fajtáinak, úgy hogy közben nem tartalmaznak légbuborékképző adalékszert.

A kutatásom során 11 receptúrát állítottam elő, azonban ezek közül csak 6 képezi a diplomamunkám tárgyát. Ezen receptúrák között szerepel egy, amelyik tartalmaz légbuborék képző adalékszert, hogy legyen összehasonlítási alapom a többi receptúrához.

A betonok fagyállóságát két fajta vizsgálattal mértem, bemerítéses és peremhámlasztásos vizsgálattal. A bemerítéses vizsgálattal a beton belső fagykárosodással szembeni ellenállását vizsgáltam, míg a peremhámlasztásos vizsgálattal a felületi fagykárosodással szembenit. A kéttípusú vizsgálatra azért volt szükség, mivel a két károsodási fajta jelentősen eltér egymástól, más körülmények között alakulnak ki és másképp is károsítják a beton szerkezetét. Összeségében a receptúrák jó fagyállósággal rendelkeztek azonban nem minden esetben feleltek meg a fagyállósági követelményeknek. Továbbá a mért eredmények alapján arra lehet következtetni, hogy a megfelelő arányú portland és kohósalakos cementadagolással lehet fokozni a beton fagyállóságát.

A fagyállósági vizsgálatokon felül végeztem nyomószilárdsági és vízzárósági vizsgálatokat is. A nyomószilárdsági vizsgálatokat többféle módszerrel is elvégeztem, így a roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati eredményeket is össze tudtam vetni. A kapott eredmények alapján az elkészített beton receptúrákról elmondható, hogy nagy teljesítő képességgel rendelkeznek.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Salem Georges Nehme fő konzulensemnek, hogy ellátott a vizsgált receptúrákkal és irányt mutatott a kutatásom során.

Köszönöm Jakab András konzulensemnek a kutatásom során nyújtott tanácsait, és hogy segített a diplomamunkám szerkezetének összeállításában.

Köszönöm Dr. Fehérvári Sándor külső konzulensemnek a diplomamunkámhoz nyújtott segítségét.

Köszönöm Szijártó Annának, Vági Istvánnak és Timár Tamásnak a receptúrák készítésekor és a próbatestek vizsgálatakor nyújtott segítségüket.

Köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszékének, hogy rendelkezésemre bocsátották a laboratóriumi berendezéseket a kutatásom elvégzéséhez.

Köszönöm az SW- Umwelttechnik Magyarország Építőelemgyár Kft-nek, hogy részt vehettem az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton.

Előregyártott betonok fagyállóságának fokozása kiegészítőanyagokkal

(Diplomamunka, 2018)

Sinka Alex
Konzulensek: Dr. Salem Georges Nehme, Jakab András, Dr. Fehérvári Sándor

Összefoglalás

Diplomamunkám témája az előregyártott betonok fagyállóságának fokozása kiegészítőanyagokkal. A fagyálló betonok készítéséhez általában légbuborékképző adalékszert használnak.

Szeretném a megfelelő hatást adalékszer nélkül elérni különböző cement, és kiegészítőanyagok felhasználásával. A légbuborékképző adalékszer hátránya, hogy alkalmazásával csökken a beton nyomószilárdsága, valamint a beton és a betonacél közötti tapadás. Ezt a kedvezőtlen hatást igyekszem a módosított keverékekkel kiküszöbölni.

A kísérleti terv alapvetően egy etalon receptet tartalmaz. Ezt az előregyártásban jelenleg is alkalmazzák. Kísérletemben ennek a receptnek 8 különböző módosulatát készítettem el. Légbuborékképző adalékszert csak az etalon keverék tartalmaz.

A fagyállóságot peremes hámlasztásos, és bemerítéses vizsgálattal ellenőriztem és hasonlítottam össze. A bemerítéses vizsgálatok során roncsolásmentes vizsgálatokat is végeztem. Az ultrahangterjedési sebesség mérést és a Schmidt kalapácsos vizsgálatokat összehasonlítottam, és megállapítottam, hogy melyik alkalmasabb a fagykárosodott beton szilárdság becslésére.

Kísérleteimmel szeretném az előregyártásban alkalmazott receptúrákat tovább fejleszteni, a kedvezőtlen hatásokat elkerülni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Előregyártott betonok fagyállóságának fokozása kiegészítőanyagokkal

(Diplomamunka, 2018)

Timár Tamás

Konzulensek: Dr. Salem George Nehme, Dr. Balázs L. György, Dr. Fehérvári Sándor

Összefoglalás

Diplomamunkám témája az előregyártott betonok fagyállóságának fokozása kiegészítő anyagokkal. Fagyálló betont elsősorban légbuborékképző adalékszer használatával állítanak elő. Az adalékszer megfelelő adagolás mellett jelentősen javítja a beton fagyállóságát. Csökkenti azonban a beton szilárdságát, csökkenti a beton és betonacélok közötti tapadást és növeli a kúszást, ami csökkenti a feszítés hatékonyságát. Diplomamunkám célja fagyálló beton készítése a felsorolt mellékhatások elkerülése mellett. Elsőként egy rövid tanulmányt készítettem a beton alkotóiról, fagyállóságáról, az adalék- és kiegészítő-anyagok hatásáról. A tanulmány alapján összeállítottam a kísérleti tervet, amiben részleteztem az alkalmazandó anyagokat és elvégzendő vizsgálatokat. Kísérleteim során 4 kiegészítő anyag, 3 féle cement és műanyag szál különböző kombinációjával próbáltam elérni a kívánt hatást. A kísérleti terv összeállítását követően 11 különböző összetételű betonból készítettem próbatesteket. Peremes hámlási és bemerítéses fagyasztási vizsgálatot alkalmaztam a fagyállóság meghatározására. A nyomószilárdság meghatározására a roncsolásos vizsgálat mellet roncsolás-mentes (Schmidt-kalapács és ultrahang-terjedés) vizsgálatokat is végeztem. A vizsgálati módszereket összehasonlítottam, hogy megállapítsam, melyik alkalmasabb a fagykárosodás kimutatására, és a fagykárosult beton szilárdságának becslésére. A kísérletek alapján megállapítottam, hogy a bemerítéses fagyasztási vizsgálat alkalmasabb az ilyen keverékek fagyállóságának vizsgálatára, a fagylehámlási vizsgálat kisebb mértékű károsodásokat mutatott. A roncsolás-mentes vizsgálatok közül az ultrahangterjedési vizsgálatot találtam alkalmasabbnak a fagykár kimutatására, és a fagykárosult beton szilárdságának becslésére, de egyéb szilárdsági vizsgálattal együtt alkalmazva a Schmidtkalapács is alkalmas a feladatra. Nagy mennyiségű vizsgálat esetén egyszerűsége miatt a Schmidt-kalapácsos javaslom, de az ultrahangos vizsgálat a megbízhatóbb eredményeket szolgáltat. A felhasznált anyagok közül a metakaolin és mészkőliszt együttes felhasználása hozta a legjobb eredményt, a szilikapor az elvárásokkal

szemben rosszabb fagyállóságot eredményezett. A kohósalak egy esetben nem felelt meg, de a többi keveréknél jó eredményeket mutatott. Azonban a metakaolint nagyobb szilárdságnövelő hatása révén alkalmasabbnak tartom a fagyállóság fokozására.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Salem Georges Nehme konzulensemnek, hogy tanácsaival segített a kísérleti terv összeállításában, a kísérleti eredmények feldolgozásában, és a feladat elvégzéséhez szükséges szabványok kiválasztásában. Köszönöm Dr. Balázs L. György és Dr. Fehérvári Sándor társ konzulensemnek a feladat elvégzése során nyújtott segítséget. Köszönetet mondok a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőanyagok és Magasépítés Tanszékének, hogy rendelkezésemre bocsátották a labort és a kísérletek elvégzéséhez szükséges eszközöket. Köszönöm Szijártó Annának és Vági Istvánnak, hogy segítettek a kísérletek, és az azzal kapcsolatos előkészítési munkák elvégzésében, és a vizsgálatokhoz kapcsolódó technikai kérdések megválaszolásában. Köszönetet mondok az NVKP_16-1-0019 "Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. Köszönöm, hogy a projekt részeként eredményeimmel részt vehettem a fagyálló beton fejlesztésében és az azzal kapcsolatos kutatásban. A diplomamunkámhoz elvégzett vizsgálatok és mérések eredményei a kutatás folytatásához felhasználhatóak.

Előregyártott elemekhez használt betonok tűzállóságának vizsgálata

(Diplomamunka, 2018)

Orf Tamara
Konzulensek: Dr. Salem Georges Nehme, Dr. Majorosné Dr. Lublóy Éva Eszter,
Dr. Fehérvári Sándor

Összefoglalás

Feladatom az előregyártott vasbeton elemek anyagának tűzállósági növelése volt, amely egy kutatási projekt részeként a NKVP fokozottan ellenálló betonok fejlesztéséhez járult hozzá.

A diplomám célja, hogy növeljem a beton tűzállóságát, mivel számos tűzeset igazolja, hogy ennek a témának a kutatása és fejlesztése még mindig nagyon fontos.

A diplomamunka első részében a szakirodalmi kutatás leírása található, amely részletesen összefoglalja a tűz hatását a betonra. Azaz a beton alkotóelemeinek megválasztása, hogyan befolyásolja a tűzállóságot, valamint az előregyártott körüreges födémpanelekre hogyan hat a magas hőmérséklet.

A diplomamunka második részében a vizsgált beton próbatestek készítéséről, a szilárdsági vizsgálatok módszeréről és eszközeiről írtam. A betonreceptúrák összetételét és azok összehasonlítását fejtettem ki.

A diplomamunka harmadik részében a hőterhelt beton kocka, valamint hasáb próbatestek mérési eredményeit részletezem, valamint értékelem a kapott eredmények, diagramok alapján. Arra az eredményre jutottam, hogy az általam vizsgált 5 különböző betonreceptúra közül tűzállóság szempontjából 500 °C-ig a 4. recept alapján készült beton viselkedett a legkedvezőbben. Ez a betonösszetétel kohósalak portlandcementtel, mészkőliszt kiegészítőanyag hozzáadásával készült. 800 °C-on azonban sokkal kedvezőbben viselkedtek a CEM I 42,5 portlandcementtel készült próbatestek.

A tapasztalatok alapján érdemes lehet megvizsgálni műanyagszál-erősítéssel, valamint bazalt és metakaolin kiegészítőanyag hozzáadásával a beton tűzállóságát.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

HDT kiegészítőanyag hatása a betonok savállóságára

(Diplomamunka, 2018)

Kertész Alexandra
Konzulensek: Dr. Nemhe Salem Georges, Jakab András, Dr. Fehérvári Sándor

Összefoglalás

Diplomamunkám során megadott receptúrákból készített beton próbatestek viselkedését vizsgáltam kénsavas környezetben. Az etalon receptúrákat kiegészítőanyagokkal módosítottam, hogy a savaknak várhatóan jobban ellenálló betonkeverék jöjjön létre.

A dolgozat első részében a beton összetevőit mutatom be, valamint részletezem a betonra ható kémiai korrózió lehetőségeit, külön kiemelve az alkalmazott kiegészítőanyagok tulajdonságait és hatásait, valamint a kénsav okozta korrózió okait és kémiai mechanizmusát.

A dolgozat második részében a kísérlet során alkalmazott receptúrák anyagait, valamint az elvégzett szabványos vizsgálatokat mutatom be. Kilenc receptúrát vizsgáltam, melyből három etalon receptúra volt hagyományos összetevőkből, majd ezekben cseréltem ki a cement tömegének egy részét metakaolinra és szilikaporra. A keverések során kocka és hasáb próbatesteket készítettem. Az elkészült friss betonon terülés mérést és testsűrűség meghatározást végeztem. 28 napos korban a kocka próbatesteken vízzárósági vizsgálatot végeztem, a hasáb próbatestek egyik fele vízbe, másik fele kénsavas oldatba került és hetente ultrahang készülékkel vizsgáltam az ultrahang terjedési sebességét a hasábokban. 56, 90 és 150 napos korban nyomószilárdság és hajlító- és húzószilárdsági méréseket végeztem.

Végül a dolgozat harmadik részében a vizsgálati eredményeket diagramokon szemléltetem, értékelem és összegzem a tapasztalatokat. Az elvégzett vizsgálatok alapján mindkét felhasznált kiegészítőanyag alkalmas a savállóság fokozására. A metakaolinnal szilárdságnövekedést és jobb vízzárást lehet elérni, a szilikapor tömör szerkezetet létrehozva csökkentette a sav károsító hatását a szerkezetek külső felületét tekintve, valamint a vizsgálatok által a bizonyíthatóan a belső szerkezet sem károsodott olyan mértékben, mint az etalon receptúráknál.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Kiegészítő anyagok hatása a cementhidratációra

(Diplomamunka, 2020)

Must Anita Barbara
Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

A dolgozatom fő célja az volt, hogy bemutassak és sikeresen alkalmazzak két mérési technikát, amelyeknek a vizsgálati eredményei a betontervezésben hasznosnak bizonyulhatnak. Vizsgálataimat cementeken és cement kiegészítő anyagokon végeztem, amelyekhez két műszert használtam: a TAM AIR Thermostat, Malvern Zetasizer NANO.

A TAM AIR Thermostat 3+3 csatornás mikrokaloriméter készülék segítségével a cementpépek, habarcsok és betonok hidratációs hőfejlődése, annak időbeli lefutása mérhető. A hozzá tartozó szoftver segítségével bővebb információt kapunk a hidratációs folyamatok lefolyásáról, illetve következtetéseket tudunk levonni anélkül, hogy nagy mennyiségben kelljen mintákat bekeverni. A Malvern Zetasizer NANO készülék a részecskék méretének, méreteloszlásának meghatározására, illetve a Zéta-potenciál mérésére alkalmas a nano-mikrométer tartományban. A hagyományos betontervezésben nem áll rendelkezésünkre elég információ a kisebb részecskék viselkedéséről, amiben ez a műszer a segítségünkre lehet. Továbbá a Zéta-potenciál ismerete információt ad arról, hogy a cementrészecskék milyen felületi töltéssel rendelkeznek, ezáltal többet megtudunk cementek és a kiegészítőanyagok diszperzióinak viselkedéséről, illetve diszperziók stabilitásának feltételeiről.

A szakdolgozatomban kitérek az általam kapott eredmények értékelésére, illetve összevetem őket a szakirodalomban tapasztaltakkal. Ezen kívül a dolgozatban a vizsgálatok eredményeit ábrákon és táblázatokon keresztül szemléltetem, amelyek segítséget nyújtanak a keverékekben lezajló folyamatok mélyebb megértésében. A legfontosabb dolog, amit a kísérleteim során megtanultam, hogy mindig ellenőrizzük a mérési körülményeket, hiszen minden apró környezeti változás befolyásolhatja a vizsgálat lefolyását és az eredményeket.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy kísérleteimhez a szükséges laboratóriumi és személyi hátteret biztosította, valamint az NVKP_16-1-2016- 0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló

és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Kopecskó Katalin egyetemi docensnek és Dr. Balázs L. György egyetemi tanárnak, hogy lehetőséget nyújtottak a fenti kutatásban történő részvételre, valamint hogy konzultációink során adott hasznos tanácsaikkal segítették szakdolgozatom elkészítését.

Köszönetet mondok továbbá Dr. Salem G. Nehme egyetemi docensnek és Horváth Szilvia VBK MSc hallgatónak, akik a kutatás során tanácsaikkal támogattak. Végül, de nem utolsó sorban köszönöm Édesapámnak, hogy a munkám során végig mellettem állt és támogatott.

SIKACONTROL AER-200 P adalékszer hatása a betonok fagyállóságára

(Diplomamunka, 2020)

Simon Petra
Konzulensek: Dr. Nemhe Salem Georges

Összefoglalás

A beton az egyik legszélesebb körben használt anyag a világon. Segítségével számos, különféle szerkezeteket építhetünk. A beton anyagi kialakítása, megtervezése függ az építmény funkciójától, annak környezetétől és az építéskori évszaktól, időjárástól. Nagy mértékben befolyásolja a betonozás folyamatát a hőmérséklet. Eltér® a beton összetétele és annak bedolgozási folyamata hideg időben való alkalmazáskor vagy melegebb időszakban végzett építéskor.

Az egyik legfontosabb fenntarthatósági probléma a fagyás-olvadás jelensége. Különösen érintettek ebben a témában azok a szerkezetek, melyek közvetlen vízzel, vagy más folyadékkal érintkeznek. Ez kiküszöbölhet® légbuborék képző szerek alkalmazásával. A légbuborékképző adalékszer javít a beton fagy okozta károk csökkentésében.

Dolgozatomban a SikaControl AER-200P jel adalékszer hatását vizsgálom a különböző vízcement tényezőj és cementtartalmú betonokra. A kísérletekhez 13 receptúrát készítek. Ebből 4 keverék referencia, 2 receptúra a MasterSphere 1000 légbuborékképző szer hozzáadásával és 7 receptúra a SikaControl AER-200P légbuborékképző adalékszerrel készül.

A receptúrák bekeverését követően frissbeton vizsgálatot végzek. A keverékek megszilárdult beton próbatestein nyomószilárdsági-, vízzárósági-, vízfelvételi-, peremes hámlasztási- és fagyállósági bemerítéses kockavizsgálatokat végzek el. A vizsgálatok során az azonos víz-cement tényezőjű¶ és cementtartalmú próbakeverékeket összehasonlítom. A kapott adatokból következtet és vonok le, milyen hatással van a SikaControl AER-200P adalékszer a beton egyes tulajdonságaira.

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban konzulenseimnek, Dr. Nemhe Salem Georgesnek és Tóth Lászlónak szeretnék köszönetet mondani a témaválasztásban való segítségért és konzulensi munkájukért, amivel jelentősen járultak szakdolgozatom sikeres megírásához.

Továbbá köszönöm Timár Tamásnak, Kováts Marcellnek és Hajós Jácintnak a próbakeverékek készítése során nyújtott segítségüket és a laboratóriumi kísérletekben való közreműködésüket. Köszönetet tartozom az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképesség¶ (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Cementkiegészítő anyagok szerepe a beton teljesítőképességének növelésében

(Diplomamunka, 2018)

Bácskai Gábor
Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Bódi István

Összefoglalás

A diplomamunkám célja különböző cementkiegészítő anyagok alkalmazásának tanulmányozása. Napjainkban igen széleskörűen alkalmazunk a cementgyártásban hidraulikus kiegészítőket. A kutatásom során ezen anyagok vizsgálatát tűztem ki célul, ezzel is elősegítve nyersanyagforrásaink megóvását, és ipari és egyéb kommunális hulladékaink másodnyersanyagként való hasznosítását.

A diplomamunkám során a portlandcementet négy különböző anyaggal helyettesítettem: Centrilit NC alumoszilikát bázisú puccolánnal, Metaver N metakaolinnal, szilikaporral illetve Microsit 20 szűrt kőszénpernyével. 11 féle keveréket vizsgáltam, mely a fent említett kiegészítő anyagokat tartalmazták különböző tömegszázalékban. A vizsgálati eredményeket egy helyettesítés nélküli, csak portlandcementet tartalmazó referenciával hasonlítottam össze. Habarcs próbatesteket készítettem a keverékek szilárdsági, tömegösszetételi és hidrotechnikai tulajdonságainak meghatározására. A keverékekhez 3 különböző frakciójú homokot adagoltam (1/2 mm, 0,2/1 mm illetve 0,08/0,25 mm). A szilárdsági vizsgálatokat 4 különböző korban (7, 28, 56 és 90 nap) is elvégeztem a puccolános anyagok tulajdonságainak minél pontosabb megismerése céljából. A kutatás során állandó paraméter volt a víz-cement tényező (v/c=0,4), a megfelelő konzisztencia elérése érdekében különböző mennyiségű folyósítót adagoltam a keverékekhez. A kísérleteim során felhasznált puccolánok hidraulikus aktivitásának megismerése érdekében meghatároztam az egyes anyagok aktivitási indexeit. Habarcs hengereken megmértem a kloridion behatolást a Nordtest Build 492 szabvány előírásai alapján, majd a próbatestek felületét mm-ként lecsiszolva meghatároztam a kloridion behatolási jelleggörbéket. Cementpép kockákat készítettem a keverékek pH értékeinek mérésének céljából. A próbatesteket 3 különböző savas közegben (kénsav, pH=1; ecetsav, pH=3 és tejsav pH=3) is vizsgáltam, tömegváltozás, térfogatváltozás illetve nyomószilárdság mérésével.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a cement megfelelő arányú helyettesítésével igen kedvező szilárdsági tulajdonságok érhetőek el. Savas közegben is bizonyos keverékek nagyobb

ellenálló képességgel rendelkeznek a referencia keveréknél, így alkalmazásuk előtérbe kerülhet olyan környezetben, ahol a cementtel érintkező anyagok pH-ja savassá válhat.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Előre gyártott saválló betonok fokozása puccolános kiegészítőanyagokkal

(Diplomamunka, 2018)

Vági István
Konzulensek: Dr. Salem Georges Nehme, Jakab András, Dr. Nehme Kinga

Összefoglalás

Napjainkban a betontechnológia fejlődésének, a korszerű adalékszereknek és a kiegészítőanyagoknak köszönhetően lehetőségünk nyílt az egyre nagyobb szilárdságú, teljesítőképességű és tartósságú betonok megvalósítására. A frissbeton összetételét a kívánt igényekhez lehet igazítani, majd pedig az abból kialakuló megszilárdult beton tulajdonságait is. Az így kialakított betonok alkalmazhatók szélsőséges környezeti hatásoknak, korrozív környezetnek kitett helyeken, mint például a szennyvízcsatornáknál, szennyívtisztító telepeken és a hűtőtornyok esetén.

Kísérleteim célja a beton savval szembeni viselkedésének alaposabb megismerése, és így a megfelelő betonösszetételek kidolgozása különböző betontechnológiai paraméterek mellett.

Diplomamunkám kezdeteként hat betonkeveréket készítettem el (őket tekintettem etalon keveréknek), később pedig különböző mértékben alkalmaztam puccolános kiegészítőanyagokat a beton savállóságának fokozásához. Tíz módosított betonreceptúrát dolgoztam ki és alkalmaztam.

A receptek kialakításakor szempont volt a megfelelő kiegészítőanyag és cement alkalmazása, mellyel fokozható az etalon betonok savval szembeni ellenállása, így metakaolin, szilikapor, mészkőliszt és pernye különböző mennyiségű adagolása, valamint három féle cement (CEM II A-S 45,5 N, CEM I 52,5 N, CEM I 42,5 N- SR0) került felhasználásra.

A kutatás fő célja a beton savállóságának és a sav korróziós folyamatának kimutatása az idő függvényében, így vizsgáltam a különböző összetételű próbatestek hajlító-húzó és nyomó szilárdságát, savállóságát, vízzáróságát illetve az ultrahang terjedési sebességét is. A vizsgálataimhoz keverékenként 15 db kockát (150 mm élhosszúságú) és 3×9 db hasábot (70×70×250 mm) használtam fel.

A savállóság meghatározásához a próbatesteket pH 1-es kémhatású kénsav oldatba (9db), pH 3-as kémhatású ecetsav oldatba (9db) és vízbe (9db) helyeztem 28 napos koruk után. 28, 90 és 180 napos savban tartási idő után vizsgáltam.

Összeségében megállapítható, hogy magasabb szilárdsági osztályú betonok készítésével növelhetjük a savval szembeni ellenállóságot. Kiegészítőanyagként a metakaolin használata javasolt mészkőliszt helyett, valamint, hogy a szilikapor és pernye együttes használata is megfelelő eredményre vezet.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni segítő munkáját, szakmai irányítását konzulenseimnek: Dr. Salem Georges Nehme PhD egyetemi docensnek, Jakab András doktorjelöltnek, Dr. Nehme Kingának. Hozzájárultak szakmai fejlődésemhez és új tapasztalatokkal gazdagodhattam.

Munkám során betekintést nyerhettem a laboratóriumban folyó mérnöki munka rejtelmeibe, nehézségeibe.

A kísérletek elvégzésében segítségemre volt Szijártó Panka, Katona Máté, Szabó Vendel, Tímár Tamás. Köszönettel tartozom a kísérletek elvégzése során tanúsított segítőkészségükért, illetve a beton megkeverése során nyújtott segítségükért.

Köszönöm az SW Umwelttechnik Magyarország Kft-nek, a BME Építőanyagok és Magasépítéstan Tanszéknek, hogy az NVKP_16-1-2016-0019 azonosítójú kutatási programban részt vehettem.

Végül köszönetet szeretnék mondani a BME Építőanyagok és Magasépítéstan Tanszéknek, hogy helyet biztosítottak a vizsgálatok elvégzéséhez, valamint, hogy rendelkezésemre bocsájtották a kísérletek során felhasznált alapanyagokat és vizsgálati eszközöket.

Geopolimer kompozitok kötőanyagának optimalizálása a teljesítőképesség fokozása céljából

(Diplomamunka, 2018)

Fejes András Márk
Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Kovács Tamás

Összefoglalás

Mára ismert, és elfogadott tény a Földünkön zajló globális klímaváltozás, amelynek számos negatív következményéről született már tanulmány. Emiatt több fórumon, így a műszaki tudományos területen is elindultak kutatások, hogy hogyan lehetne ezeknek a változásoknak gátat szabni, azokat lassítani.

Az építőipar az egyik legnagyobb kibocsátója a klímaváltozásért felelős, üvegházhatású gáznak, a CO2-nak. A kibocsátás legnagyobb része a cementgyártáshoz köthető, ugyanis durva becsléssel, egységnyi portlandcement gyártásakor, vele megegyező mennyiségű széndioxid kerül a környezetbe. Mivel a világon a legelterjedtebb építőanyag a beton, amelynek legfőbb összetevője a portland cement, így az ipar is felismerte, hogy mérsékelni kell a cement felhasználást. Ezt elsősorban másodlagos kötőanyagok cementhez való keverésével igyekeztek megvalósítani, a felhasznált cement mennyiségének csökkentése érdekében. A másodlagos kötőanyagok a cementhez hasonló, hidraulikus kötésre képesek, azonban jellemzően kisebb hatásfokkal.

Létezik egy teljesen más módszer, miszerint ezeket a másodlagos kötőanyagokat (pl. pernye, kohósalak), mint alapanyagokat lúgos közegben, alkáli aktiváljuk. Ezzel az eljárással nem a megszokott kristályos szerkezet alakul ki, hanem egy amorf polimer szerkezetű anyag keletkezik, amelynek számos előnye származik betontól eltérő szerkezetéből. Így a magas korai szilárdsága, hő-, tűz- és kiváló savállósága. Ennek az ún. polimerizációs folyamatnak az eredménye a geopolimer. A GP előállításához egyáltalán nincs szükség portland cementre, így nem cement helyettesítésről beszélhetünk, hanem egy teljesen cement mentes, ipari melléktermékekből készülő kötőanyagról.

A GP-ek általános elterjedésének gátat szabnak összetevőik lokálisan eltérő tulajdonságai, hiszen azok belső összetétele, minősége a felhasznált alapanyag minőségétől és feldolgozásának körülményeitől erősen függnek. Így a világ különböző pontjain született kutatások, azok eredményei, ritkán használhatók fel közvetlenül máshol, ezek leginkább csak

elveikben segítik egymást. Szükséges van tehát mindenhol lokális kutatásokra, az ott jelenlévő GP összetevők alkalmazhatóságát illetően. A hazai elterjedésnek pedig egyelőre nehézsége, hogy a szakirodalmak döntő többsége idegen nyelvű, magyarul írt szakcikket csak elvétve találni. Fontos tehát, hogy nemzetünk is bekapcsolódjon ennek az ígéretes, környezeti szempontból is kívánatos anyagnak a kutatásába, és hazai elterjedését, az anyag általános megismerését elősegítve, magyar nyelvű szakirodalmak is szülessenek.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

The role of SCMs in the assessment of the corrosion risk of steel reinforcement

(Diplomamunka, 2020)

Vajda Noémi Krisztina
Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Koris Kálmán

Abstract

The main objective of my thesis research was to study the effects of exposure of chloride corrosion when different types and amounts of supplementary cementing materials (SCMs) were added to the ordinary Portland cement. The applied SCMs were two different types of metakaolin (Centrilit NC and Metaver N), Microsit 20 fly ash and Silica Fume. During the completion of my thesis, I examined the effect of these different supplementary cementitious materials on the properties of hardened mortar and cement.

The building technology nowadays highly relies on the application of concrete. Thus concrete is one of the most widely produced construction materials in the entire world. The increasing population on the world, the growing demand of the living standards and comfort, and the quick development of the economy causes an increasing demand for infrastructure development and hence concrete materials. The methods to develop the quality of concrete, estimate the service life and manage the effect of aging of concrete structures are under development in many fields of civil engineering. The (combined) application of different supplementary cement materials is one possible way to solve the problem of durability of concrete structures, due to their special properties.

During my research, I replaced the Portland cement in variable mass ratios (3 m%, 5 m%, 7 m%, 10 m%, 17 m%), using 4 different kinds of SCMs. I compared the test results with a standard reference concrete sample, that contained no additional cementitious materials. The water content was a permanent parameter in case of the cementpaste mixtures, and I strived to ensure the same concistency class in case of the mortar mixtures. I used the flow table test to determine the fresh mortar consistency and I used different test methods to determine the hardened cement/mortar properties (compressive strength, flexural strength, density, chloride migration, chloride content, water absoprtion, capillary water absorption, resistance to acid attack).

The diffusion coefficient almost halved its value between 28 and 90 days. The dynamics of change was highly dependent on the proportion of the SCMs where SF seemed the most beneficial. The expectation, that the lower permeability would result in reduced chloride ion migration could not be verified based on my samples. Adding most of the SCMs increased the water absorption, only a few types of mixtures showing a beneficial effect. The hydration process was improved by the SCMs.

An association between the hydration rate and the long-term strength seems plausible. The results of the flexural strength corresponded acceptably with the results of the compressive strength.

Acknowledgement

I would like to thank Hungarian Research Grant NVKP_16-1-2016-0019 ”Development of concrete products with improved resistance to chemical corrosion, fire or freeze-thaw”.

HDT kiegészítőanyag hatása a betonok savállóságára

(Diplomamunka, 2020)

Cserki László Márk
Konzulensek: Dr. Nemhe Salem Georges, Dr. Nehme Kinga

Összefoglalás

A beton az építőipar leguniverzálisabb terméke, egy nagyszerű anyag, rendkívül sokoldalúan alakítható, formázható és összerakható. Mint mindennek, a beton alkalmazásának is vannak korlátjai, melyek kellő tudással és odafigyeléssel általában leküzdhetők. Savaknak, vagy vegyületeknek jól ellenálló betonok megalkotásához ismernünk kell a betonban végbemenő folyamatokat és azok okait. A savak roncsolják a cementkövet, ezzel a betonszerkezetünk tulajdonságaira negatívan hatnak. A lehető legtömörebbé kell alakítani az összetételt, hogy a káros anyagok bejutásának mélysége csökkenjen, valamint a savak által könnyen pusztítható klinker mennyiségét redukálni kell.

A kutatás során két terméket vizsgáltam, ezek a HDT S és a HDT P kiegészítőanyagok. Három féle cementtartalmat (330,360, 400 kg/m3) és víz-cement tényezőt (0,38; 0,45; 0,52) alkalmaztunk a keverékekben. HDT S jelű kiegészítőanyagból 3%-ot alkalmaztam a cement tömegére vetítve, HDT P jelűből 6%-ot. Az etalon mintákban 20 kg/m3 metakaolin kiegészítőanyag található. A próbatesteket vegyesen tároltam, 7 napig víz alatt, majd a vizsgálatok elvégzéséig laborlevegőn, vagy a savállósági vizsgálatok esetében víz alatt, illetve savban.

Az általam alkalmazott HDT anyag felhasználásának elsődleges célja a betonkeverék tulajdonságainak fokozása volt. Ezért diplomamunkám során a szilárdság és a tartósság vizsgálatát tűztem ki fő célul. Az elvégzett laboratóriumi vizsgálatok: nyomószilárdság vizsgálat, vízzáróssági vizsgálat, hajlító és húzószilárdsági vizsgálat, kopásállósági vizsgálat, peremes fagyhámlás vizsgálat, bemerítéses fagyasztás vizsgálat, savállósági vizsgálat, ultrahangos vizsgálat.

A kapott eredmények kiértékelése alapján megállapítható, hogy a HDT egyesesetekben javítja a beton tulajdonságait, és a savakkal szemben is ellenállóbbnak bizonyulnak megfelelő cementmennyiség és víz-cement tényező mellett.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Nehme Salem Georges egyetemi docensnek és Szijártó Annának, hogy tudásukkal és tanácsaikkal segítették a munkámat. Köszönetet mondok az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszékének a lehetőséget a laboratórium és a szükséges eszközök használatára. Köszönöm Tanai Dórának, Gombos Boglárkának, Németh Péternek, és Füzesi Ferdinándnak az általuk nyújtott támogatást és bíztatást.

Kiegészítő anyagok hatása a cementek hidratációjára és a beton tulajdonságaira izoterm kalorimetria és Zeta-potenciál vizsgálattal elemezve

(Diplomamunka, 2020)

Horváth Szilvia
Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

Vegyészmérnök hallgatóként céljaim között szerepelt megismerkedni a cementkémiával, a cement kötése közben lejátszódó hidratációs reakciók bonyolult, és mégis lenyűgöző összetettségével.

A kutatási feladat során áttekintést nyújtottam a következő témakörökben: (i) a Zéta-potenciál lehetséges mérési módszerei, a cementkiegészítő anyagok Zéta-potenciálra vonatkozó hatása, (ii) a hidratációs hő fejlődésének lehetséges vizsgálati módszerei, a cementkiegészítő anyagok hatása a cementek hidratációs hő fejlődésére.

A kísérleti részben kiválasztott cementeken és kiegészítőanyagokon, valamint cement és kiegészítőanyag keverékeken vizsgáltam az anyagok Zéta-potenciálját, majd ezt követően tanulmányoztam a hidratációs hő fejlődésének változását a kiegészítőanyagok különböző adagolásai hatására.

Munkám során részt vehettem az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című kutatási projektben, amely során célul tűztük ki azt, hogy a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen először használjunk Zeta-potenciál és izoterm kalorimetriás méréseket a különböző cementek és kiegészítő anyagok tulajdonságainak, illetve egymásra való hatásainak jellemzésére, értékelésére. Ehhez lehetőségem volt a projekt során beszerzésre került Malvern Zetasizer Nano ZS Zeta-potenciál mérő, valamint TAM Air Isothermal Calorimeter készülékeket kipróbálni és a kutatási tervnek megfelelően használni. Célunk volt megismerni mindkét módszer módszertanát és jelentőségét a kutatás tématerületén belül, valamint kidolgozni az eljárást, amellyel elősegíthetjük a jövőbeni méréseket, kutatásokat.

A Zeta-potenciál mérésekkel a töltésviszonyokra támaszkodva próbálunk következtetéseket levonni a cement – kiegészítő anyag rendszer reológiájára és ebből levonni, ami elsősorban a

kevesebb cement, illetve portlandcement klinker felhasználását célozza, de emellett az anyag mechanikai és tartóssági tulajdonságaira is számos pozitív hatással lehetnek.

A kalorimetriás mérésekkel a teljes hőfejlődésre koncentrálva igyekeztünk feltérképezni, hogy megismerjük, az egyes kiegészítő anyagok milyen irányban és milyen mértékben vannak hatással a cement hidratációja során felszabaduló hőre. Jövőbeli célként kitűzve pedig azt szerettük volna vizsgálni, hogy ezek a hőfelszabadulás változások milyen reakciók eredményeiként következnek be.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Geopolimer habarcs tulajdonságainak javítása

(Diplomamunka, 2021)

Russói András
Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

A globális klímaváltozás napjaink legnagyobb kihívása. A jelenségért elsősorban az emberiség által kibocsátott üvegházhatású gázok felelősek. A cementgyártás az egyik legnagyobb kibocsátó, az emberiség szén-dioxid kibocsátásának 4-7 %-ért felel, és ez azt jelenti, hogy a fosszilis tüzelőanyagok használata után a második legnagyobb ipari kibocsátó. Világszerte felismerték, hogy szükség van újfajta cementeket/kötőanyagokat előállító technológiákra, illetve a hagyományos portlandcementet pótló anyagokra. Széleskörűen kutatják az alkáli aktivált anyagok, geopolimerek alkalmazási lehetőségeit, amelyek lehetőséget nyújtanak sok, jelenleg hulladékként ismert anyag hasznosítására is, másodlagos nyersanyagként. Habár az alkáli aktivált kötőanyagok olyan tulajdonságokkal is rendelkezhetnek, amelyekre a cementkötésű anyagok nem képesek, a helyileg rendelkezésre álló anyagok (pl. pernyék) csak ritkán ideális alapanyagai a geopolimernek.

Feladatom volt a geopolimer kötőanyagokkal kapcsolatos különleges tulajdonságok tanulmányozása, a fellelhető irodalmak és legfrissebb kutatási eredmények alapján. Geopolimer habarcs receptúrán vizsgáltam az anyagok szilárdulási ütemét, térfogatváltozását, valamint mechanikai tulajdonságait. Megvizsgáltam, lehet-e javítani a zsugorodáson szálakkal vagy egyéb anyagokkal. Vizsgáltam mesterséges (AR-üvegszál és PP mikroszál), valamint természetes (kender és len) szálak alkalmazásának lehetőségét a geopolimer habarcsaóban, valamint ezek hatását a zsugorodásra és a magas hőmérséklettel szembeni ellenállóképességre. A kísérleti terv alapján elkészítettem a kísérleti próbatesteket, majd elvégeztem három korban a szilárdsági vizsgálatokat, emellett a receptúrák tömegösszetételi és hidrotechnikai jellemzését. Vizsgáltam a próbatestek zsugorodási hajlamát, a zsugorodás csökkentésének lehetőségeit. Vizsgáltam a vasbeton szerkezetek egyik legfontosabb tartóssági paramétereként ismert kloridion migrációs koefficiens csökkentésének lehetőségeit, amely jellemzi a geopolimer habarcsok kloridionok behatolásával szembeni ellenálló képességét.

28 napos korra a geopolimer habarcs nyomószilárdsága az AR-üveg- és a kenderszál alkalmazása esetében javult leginkább, majd sorrendben a lenszál > PET > PP-szál > referencia. A hajlító-húzószilárdság (28 napos) vizsgálati eredmények sorrendben: kenderszál

> AR-üvegszál > lenszál > PET > PP-szál > referencia. A testsűrűség alakulása sorrendben: AR-üvegszál > kenderszál > PP > PET > lenszál > referencia. Magas hőmérsékleten vizsgálva, 300 °C-on a keverékek szilárdsága nőtt (a szilárdsági értékek 25,2 és 50,9 MPa között adódtak), míg 800 °C-on 4,86 és 13,2 MPa közötti értékeket kaptam. Továbbá a szálakkal eredményesen tudtuk csökkenteni a geopolimer habarcs zsugorodását, valamint kloridionok behatolásával szembeni ellenálló képességét is.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet tartozom az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképesség¶ (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Előre gyártott betonok fagyállóságának fokozása kiegészítőanyagokkal

(Szakdolgozat, 2019)

Szijártó Anna

Konzulensek: Dr. Salem G. Nehme, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

A Budapesti Műszaki Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke (BME) az SW-Umwelttechnik Magyarország Építőelemgyár Kft. (SW) együttműködésével részt vesz az NVKP_16-2016-0019 azonosítószámú projektben. Jelen munka a fagyálló betonok teljesítőképességének fokozására kíván megoldást találni. Diplomamunkám során az etalon keverékeket, összesen négy darabot az SW majosházi gyáregységében, a módosított receptúrákat pedig a BME laboratóriumában készítettem el. Összesen 23 módosított keverék készült. A kutatások során változónak tekintettem a cement és a kiegészítőanyag fajtáját és mennyiségét, valamint a légbuborékképző adalékszerszer alkalmazását. A két éve folyó vizsgálatok egy része már bemutatásra került három diplomamunka során, ám a kimaradó eredmények és a különböző paraméterek összehasonlítás jelen diplomamunka során került bemutatásra. A keverékek teljesítőképességének meghatározásához nyomószilárdságot, vízzáróságot és kétféle fagyállóságot – bemerítéses és peremes hámlasztás - vizsgáltam. Lehetőség szerint hosszú idejű mérés is készült. Nyomószilárdsági és vízzárósági szempontból a legtöbb módosított keverék megfelelő eredményeket adott. A fagyasztási vizsgálatok egy része megfelelt, a maradék nem teljesítette egyik környezeti osztály feltétel rendszerét sem. A kapott eredmények alapján több következtetés is levonható. CEM I 42,5 N-SR0 típusú cement alkalmazása esetén mind a metakaolin, mind a szilikapor hozzáadása, mind pedig a mészkőliszt helyettesítése kohósalakkal jelentős szilárdságbeli növekedést eredményezett. Az M7-es keverék kivételével minden keverék minden korban megfelel az XV3(H)-s előírásnak. A kohósalak hozzáadása egyedül az M13-as keverék esetén nem hozott jó eredményt bemerítéses fagyasztási vizsgálat esetén, a legtöbb módosított keverék megfelelt az XF2-es határnak 28 napos korban kezdve, 50 ciklus eltelte után. A mészkőliszt mellett másik kiegészítőanyagot is tartalmazó keverékek minden esetben megfeleltek vagy az XF2-es, vagy az XF4-es határértéknek, viszont amikor metakaolin és szilikapor is alkalmazásra került a mészkőliszt

mellett az 50 ciklus eltelte komoly szilárdságcsökkenést okozott. Az E3 keverék az egyetlen az etalon receptek közül, amelyik minden korban megfelel a legszigorúbb fagylehámlási határértékeknek. A CEM I 52,5 R cement alkalmazásával készült keverékek 28 napos korban kezdett vizsgálatai esetén minden keverék megfelelt az XF4-es kitéti osztály határértékének. A módosított receptúrák fagyállóságnak való ellenállása jobb, mint az E1 és az E2 keverékeknek. Az E3 keverék alapvetően is megfelelően ellenálló, így annak javítása nem lehetséges.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönök mindent konzulensemnek, Dr. Salem G. Nehme egyetemi docensnek. Az ő tudása, segítsége, támogatása, és bátorítása nélkül jelen diplomamunka nem jöhetett volna létre. Köszönöm Dr. Borosnyói Adorjánnak, hogy az alapképzés során elindított ezen az úton. Mérhetetlen nagy köszönettel tartozom Sólyom Sándornak, aki a mesterképzés során segített ezen az úton maradni, és akinek azóta is bármikor számíthatok a szakmai támogatására. Köszönöm Vági Istvánnak a hihetetlen nagy támogatást, lelkesítést és törődést, valamint köszönöm Sinka Alexnek, Szabó Vendelnek és Timár Tamásnak a próbatestek előkészítésében és a vizsgálatok elvégzésében nyújtott óriási segítséget. Köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek és Laboratóriumának a lehetőséget a kurzus elvégzéséhez, valamint a labor és a szükséges eszközök használatához. Köszönöm Siba Anettnek a diplomamunkám írása közbeni támogatást. Köszönöm az SW-Umwelttechnik Magyarország Építőelemgyár Kft-nek, hogy részt vehettem az NVKP_16-1-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című kutatásában.

Cementkötésű anyagok és tartósság az összetétel, a szilárdság és a tömegösszetételi tulajdonságok tükrében

(Szakdolgozat, 2020)

Zsovár Zsófia Ilona
Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin

Összefoglalás

A vasbeton szerkezetek biztonságosabb és tartósabb, hosszabb élettartamú tervezése elengedhetetlen a fenntartható jövő szempontjából. A beton egy többkomponensű anyagi rendszer, amelynek viselkedését összetevői befolyásolják. A vasbeton szerkezetek egyik legáltalánosabb tönkremeneteli oka, az acélbetétek korróziója, mely két módon, kémiai korrózióval és elektrokémiai korrózióval jön létre. Előbbi a beton karbonátosodása miatt, utóbbi a kloridion behatolás miatt.

A külföldi és hazai szakirodalom kutatása során a cement típusokon kívül megismertem a cementkiegészítő anyagokat és azok működési mechanizmusát, illetve a hozzájuk kapcsolódó vizsgálati módszereket.

A diplomamunkám során különböző kötőanyagokkal készített cementpépek és 0,4 víz/cement tényezővel elkészített habarcsok szilárdsági, tartóssági és tömegösszetételi tulajdonságait értékeltem. A próbatestek az NVKP_16-1-2016-0019 számú kutatási projekt keretében készültek.

Kétféle mintacsoportot vizsgáltam, egy csak cementekből állót, amelyet „R” jelű mintáknak neveztem és egy „számozott” jelű mintacsoportot, amelyben a cementkiegészítő anyagok hatását tudtam megfigyelni.

A kiértékelt vizsgálatok a „számozott” és „R” jelű minták esetén:

- Testsűrűség vizsgálat habarcs próbatesteken.
- Hajlító-húzószilárdság vizsgálat habarcs próbatesteken.
- Nyomószilárdság vizsgálat habarcs próbatesteken.
- Higanypenetrációs porozimetria vizsgálat.
- Kémiai ellenállóképesség vizsgálat kézi, gépi módszerrel.
- Kloridion behatolás vizsgálat habarcs próbatesteken

A számozott minták vizsgálata során megállapítottam, hogy a metakaolint (MK1 és MK2 típusú minták) testsűrűsége csökkent 2 éves korban, 1 éves korhoz képest. Szilárdságuk emelkedett,

azonban 17 m%-ot tartalmazó MK1 és MK2-es próbatesteknél ez a tendencia. MS kiegészítő anyag a kloridmigrációs koefficienst a vizsgálatok alapján pozitívan befolyásolja.

Az „R" jelű minták vizsgálatai során különböző szulfátálló, nem szulfátálló, kohósalak és kohósalak cementeket értékeltem ki 1 éves korban. Porozitás és fajlagos felület az idő eltelte során csökken. A legnagyobb fajlagos felületet és porozitást az R3-as mintánál mértek, amely a CEM III/A 32,5 N kohósalak cement felhasználásával készült. Nagyjából az össze próbatest hasonló kloridmigrációs koefficiens értékekkel rendelkezik és várhatóan közel azonos értékeket is vesz fel. Az R3-as kohósalak cement habarcsminta kloridion migrációs koefficiense kezdetben is jóval kisebb értékeket vesz fel.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy a diplomamunkámhoz a kísérletek adatait és személyi hátteret biztosította.

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani az Atlasz Mérnökiroda Kft-nek, hogy támogatták a tanulmányaimat.

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Dr. Kopecskó Katalinnak, aki konzultációim során hasznos tanácsokkal láttak el a diplomamunka készítése terén.

Körüreges födémpalló betonjának fejlesztése a tűzállóság fokozása céljából

(Szakdolgozat, 2020)

Biró András
Konzulensek: Dr. Majorosné Dr. Lublóy Éva Eszter, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszéke egy konzorcium tagjaként részt vett az „NVKP_16-1-0019 Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” pályázat keretein belül megvalósuló kutatás termékfejlesztési projektben, amelynek része volt többféle előregyártott szerkezeti elem tűzállóságának javítása is. Az egyik ezek közül egy 200 mm magas körüreges födémpalló volt, amelynek a tűzzel szembeni ellenállóképességét a geometria megváltoztatása nélkül volt szükséges javítani.

A projektet megelőzően 1 (2007), a projekt folyamán 9 körüreges födémpalló tűzvizsgálat készült 200 mm magas elemekkel. A 2007-es vizsgálat és a projekt elején (2017) elvégzett referencia vizsgálat között meglepő különbségeket tapasztalt a gyártó, pedig különbség csak némileg a terhelés módjában (2007-ben egyenletesen megoszló terhelést és középen koncentrált erőt alkalmaztak, míg 2017-től kezdve két darab él mentén megoszló erővel terhelték az elemeket) és az alkalmazott adalékanyagban volt. A korábbi vizsgálat során REI 60, míg 2017-ben csupán REI 20 tűzállósági határértéket állapítottak meg. A 2017-es tartó a diplomamunka során is ismertetett M10 jelű dolomit adalékanyagos receptúrával készült, míg a 2007-ben vizsgált elemhez hasonló receptúrát alkalmaztak, de kvarc adalékanyaggal.

Az M10 betonreceptúrának 8 módosított verzióját vizsgáltam (M11-M18) hőterhelést követő maradó nyomó és hajlító-húzószilárdság szempontjából. Az egyes módosításoknál minden esetben csak egy-egy paramétert változtattam, hogy a változások okai követhetők legyenek. Vizsgáltam a dolomit adalékanyag andezitre történő cseréjének hatását, valamint a kohósalak, metakaolin, szilikapor és a műanyag mikroszál adagolásának hatását.

A szilárdságvizsgálatok alapján andezit adalékanyag mellett, a kohósalaktartalmú CEM II A-S 42,5 N cement alkalmazása, további 30 kg/m3 kohósalak adagolással bizonyult a legelőnyösebbnek hőterhelés utáni maradó szilárdság szempontjából, ha nem vesszük figyelembe a száladagolás hatását. A műanyag mikroszálak adagolása nem kompatibilis az extruderes gyártástechnológiával.

A megvalósult nagyelemes tűzvizsgálatok alapján a vizsgált adalékanyagok közül a várttal ellentétben nem az andezit, hanem a mészkő és a dolomit alkalmazása volt a legelőnyösebb, amire magyarázatként szolgálhat az, hogy más forrásból származott a födémpallók gyártásához felhasznált andezit, mint a laborvizsgálatokhoz rendelkezésre álló. Emiatt felmerült az adalékanyagok előzetes minősítésének igénye tűzhatásra.

A nagyelemes tűzvizsgálatok további tanulsága volt a megtámasztási és terhelési viszonyok jelentős hatása a tűzállóságra. Az oldalirányú alakváltozások meggátolására alkalmazott pántolás a háromszorosára növelte a tűzállósági határértéket. Javasolt ezen paraméterek további nagyelemes és modelleken (VEM) történő vizsgálata.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztés” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Összehasonlító vizsgálat új típusú légbuborékképző adalékszerrel az előregyártásban

(Szakdolgozat, 2020)

Polgár Péter
Konzulensek: Dr. Salem G. Nehme, Molnár Tamás

Összefoglalás

Diplomamunkámat az SW Umwelttechnik Magyarország Kft. majosházai gyáregységében végeztem, ahol a kísérleti fejlesztés egy részeként, egy az előregyártásban előállított elemnek egy új irányzatot képviselő adalékszerrel végzett szilárdsági és fagyállósági tulajdonságait vizsgáltam. Dolgozatomban összehasonlítottam 2 db hagyományos légbuborékképző adalékszerrel készített etalon és 6 db újtípusú MasterSphere 2000 nevű fagyállóságot javító adalékszert tartalmazó fejlesztett keveréket.

A jelenleg az építőiparban még nem alkalmazott MasterSphere 2000 adalékszer miatt a vizsgálat során tapasztalatokat gyűjtöttem és ellenőriztem az adalékszernek a gyártó által javasolt mennyiségben, különlegesen magas vízfelvételét és hatását a friss beton tulajdonságaira. Kísérleteim alkalmával a megszerzett információk folyamatos kiértékelésével tökéletesítettem keverékterveimet, ami főként a hozzáadott víz mennyiségi változtatásán kísérhető nyomon.

A kizsaluzási idő nagyon fontos az előregyártásban, így az etalon és fejlesztett keverékeknél megvizsgáltam a korai- és a 28 napos szilárdságot is az SW Umwelttechnik Kft. majosházi betonlaborjában. 2db fejlesztett keveréknek a vízzárósági vizsgálatát külső akkreditált labor végezte. A fagyállóság teljesítésére a keverékekből vett próbakockákból a peremes hámlasztási vizsgálatot, továbbá 1 db etalon és 2 db fejlesztett keverékből készített „termékszerű" elemek fagyhámlás vizsgálatát is külső akkreditált labor végezte. Távolsági tényező vizsgálatára is sor került, amelyet a BASF laboratóriuma végzett. Csak az etalon keverékek távolsági tényezőjét sikerült megmérni, míg a fejlesztett keverékeknek az alkalmazott ATLAS számítógépes szoftver segítségével sem sikerült detektálni és feltérképezni a légbuborékrendszerét.

A vizsgált etalon keverékek közül az E1 megfelelt, míg az E2 korai és 28 napos szilárdsága nem felelt meg az elvárt kitéti osztálynak. A fejlesztett keverékek korai szilárdsága rendre megfelelt, azonban a 28 napos eredmények közül 1db (M6 keverék) nem megfelelő minősítésű.

Az MSZ 4798:2016 szabvány (és kiegészítő szabványai) szerint, a vizsgált M5 és M6 keverék vízbehatolási mélysége megfelelt az előregyártott elemnél megkövetelt XV2(H) vízzárósági feltételnek, sőt azon felül a szigorúbb határértékű XV3(H) kitéti osztálynak is. Az E2T etalon és M2T fejlesztett keverékből készült „termékszerű elemek" fagyhámlás értékei megfeleltek az MSZ EN 1338 szabvány által előírt határértékeknek. Az M1T alacsonyabb MasterSphere 2000 adagolással nem teljesítette ezutóbbi feltételt.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Új generációs pórusképző adalékszerek elvi alkalmazhatósága a hídépítésben

(Szakdolgozat, 2020)

Nagy Andrea Tünde
Konzulensek: Dr. Salem G. Nehme, Neszter Róbert

Összefoglalás

A diplomadolgozat – alaptémáját tekintve – a légbuborékképző adalékszerek nélkül készülő betonok fagy- és olvasztósó-állóságával foglalkozik. A témát két útvonalon közelítettem meg:

- egyrészt a hídépítési betonok szabványi előírásain,
- másrészt az alaptémát egésszé formáló, méltán 'új generációsnak' nevezhető

MasterSphere 2000 adalékszerrel végzett vizsgálatokon keresztül. A dolgozat első része az alaptémában rendelkezésre álló irodalmat, szabványi előírásokat mutatja be, majd a MasterSphere 2000 adalékszerrel már korábban elvégzett gyártói vizsgálatok eredményeit, illetve a kísérletek alapanyagát képező, hídépítésben jelenleg is alkalmazott 'alap' beton tulajdonságait ismerteti. A MasterSphere 2000 adalékszerről – mely jelenleg Németországban, mint konzisztencia módosító, stabilizáló adalékszer van forgalomban – rendelkezésre álló ismeretanyag alapján olyan párhuzamosan vizsgálható keverékek receptúráit terveztük meg, melyeken elsősorban nem a konzisztencia módosító hatást, hanem az ez idő tájt másodlagosként számontartott fagy-és olvasztósó-állóságra kifejtett hatásokat vizsgálhattuk.

Ennek eredményeként két keveréksorozat állt elő. A sorozatok alapanyagai egymástól az adalékanyagokban különböztek: nagyobb finomrész tartalmú dunavarsányi-, továbbá finomrész hiányos alsózsolcai adalékanyag frakciókat használtam fel. Az egyes sorozatok keverékei pedig a kísérleti adalékszer adagolási mennyiségében, és az esetlegesen hozzáadott többletvíz, és folyósító adalékszer mennyiségében tértek el egymástól.

A kísérleti keverékek előállítási folyamata során szerzett tapasztalatok, illetve a keverékekből származó minták vizsgálati eredményei alapján megállapításokat fogalmaztam meg, és a levont következtetések alapján további lehetséges kísérlet, kísérletek témáját, tematikáját állítottam össze.

A viszonylag kis mintaszámot (165 db) felsorakoztató kísérletsorozat eredményei alapján egyértelműen megállapítható, hogy további, sokkal szélesebb körben végzendő vizsgálatok lebonyolítására van szükség ahhoz, hogy az egyébként légbuborékképző adalékszer nélkül készülő hídépítési betonok esetleges kiválthatósága szakmailag is alátámasztott legyen. A

keverékek előállítását és a vizsgálatokat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztem.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Dr. Salem Georges NEHME tanár úrnak a téma választásában és ezen újgenerációs adalékszerrel való megismerkedésben nyújtott rendkívüli segítségért, aki teljes hátteret biztosított a próbakeverések lebonyolításához, a mérések, vizsgálatok elvégzéséhez a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumában, ahol Szijártó Anna, Timár Tamás, Vági István, Hajós Jácint, Simon Petra gyakorlati tapasztalataikkal nyújtottak támogatást.

Ugyanígy köszönettel tartozom Neszter Róbertnek (A-Híd Zrt.), aki a téma iránt elkötelezett hatalmas lelkesedésével, betontechnológusként szerzett gyakorlati tudásával és tapasztalatával irányította munkámat. Továbbá Török Zsuzsannának (A-Híd Zrt.), aki lehetővé tette tanulmányaim megkezdését, és folyamatos szakmai támogatást nyújtott mind munkavégzésem, mind pedig induló szakmagyakorlásom terén.

Természetesen köszönettel tartozom Kappel Viktornak a BASF Hungária Kft. képviselőjének, aki rendelkezésemre bocsátotta a vizsgálatsorozat elengedhetetlen kellékét, a MasterSphere 2000 néven forgalomba hozott adalékszert, és lehetővé tette a megszilárdult keverékminták távolsági tényezőjének soron kívüli, gyors vizsgálatát Ausztriában. Továbbá köszönettel tartozom Tamás Istvánnak, a Frissbeton Kft. miskolci és berentei betonüzem vezetőjének, aki a próbakeverésekhez szükséges alapanyagok (adalékanyagok, cement) biztosításával járult hozzá diplomamunkám elkészítéséhez. Nem utolsó sorban köszönetet mondok az NVKP 16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korróziónak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

TDK MUNKÁK

Cement kiegészítő anyagok hatása a cementek hidratációjára, izoterm kalorimetriával és Zéta-potenciál vizsgálattal elemezve

(TDK dolgozat, 2019)

Must Anita Barbara

Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

A feladatom során a különböző cementek viselkedését vizsgáltam kiegészítőanyagok hatására. Elsődleges feladatom a cementek hidratációshőjének és Zéta-potenciáljának vizsgálata, megfigyelése volt. Ehhez TAM AIR Thermostat és Malvern ZetaSizer NANO készülékek álltak rendelkezésemre.

A tudományos cikkeket alapul véve, desztillált vízben diszpergálva, 20 °C-on itt is beigazolódott, hogy a cementek és a kiegészítő anyagok Zéta-potenciálja alacsony lesz. A mikrokaloriméteres vizsgálatra a mi esetünkben is el lehet mondani, hogy a hidratáció 5 szakasza a görbén szintén megjelenik, de esetünkben sem érdemes figyelembe venni az első szakaszt, mivel a keverés a gépen kívül történt. Az általam kevert pépek hidratációhő lefutására elegendőnek bizonyult 48 órás vizsgálati időtartam. Csak 1-2 vizsgálati minta esetében bizonyult ez az időtartam kevésnek.

A szakirodalomban leírt mérések többségéhez hasonlóan esetünkben is beigazolódott az a feltételezés, hogy a cementek és a kiegészítő anyagok hidratációja összetett folyamat. Ezt mutatja a két csúcs a görbéiken.

A keverési arányokat tekintve a Microsit 20 kőszénpernyével kevert minták mérésénél mutatkozott a leghosszabb hidratációs hő lefutási idő. A másik két kiegészítő anyag (metakaolin és szilikapor) nem befolyásolta ilyen mértékben a hidratációs hő lefutásának időtartamát. Ezeket az eredményeket érdemes figyelembe venni a betontechnológiában.

Elmondhatjuk, hogy a cementek kicsi abszolútértékű Zéta-potenciállal és viszonylag nagy szemcsemérettel rendelkeznek. A kiegészítő anyagoknál pedig pont fordított a helyzet. Az adalékanyagok kicsi szemcseméret átmérője az elkeverés során jobban be tud épülni a nagyobb átmérők okozta hézagokba, ezáltal fokozva a beton tömörségét csupán a szemcseméretük alapján. Ezt követi a kémiai (puccolános) reakció, ami tovább növeli a beton szilárdságát.

Ezeknek a pépeknek a szilárdságát is érdemes lenne a továbbiakban megvizsgálni, valamint a Zéta-potenciálból lehet következtetni a szemcsék mozgásának gyorsaságára, amit érdemes lenne összevetni az ülepedési idővel. További érdekes kutatási irány az adalékszerek hatásának vizsgálata a Zéta-potenciálra és a reológiai jellemzőkre (konzisztenciára). Ezt a néhány gondolatot a kísérlet tovább gondolása érdekében éreztem fontosnak megjegyezni.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy kísérleteimhez a szükséges laboratóriumi és személyi hátteret biztosította A szerző köszönetet mond az NVKP_16-1-2016- 0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Kopecskó Katalinnak és Dr. Balázs L. Györgynek, akik konzultációink során adott hasznos tanácsaikkal segítették a TDK munkám elkészítését.

Cementkötésű anyagok kémiai korróziójának és ellenállóképességének tanulmányozása

(TDK dolgozat, 2019)

Somlai Bálint, Kováts Marcell

Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

Kísérleteink során kereskedelmi forgalomban kapható, valamint laboratóriumi (kísérleti) kohósalak tartalmú cementek savkorróziós ellenállóképességét vizsgáltuk. Ezen kívül tanulmányoztuk azokat a tulajdonságokat, amelyekkel összefüggésbe hozható az ellenállóképesség, valamint a folyamatokat is, amelyeket fontosnak véltünk a savkorróziós ellenállóképesség szempontjából. Az eredmények alapján az alábbi következtetésekre jutottunk:

- A legnagyobb szilárdsággal mind habarcs, mind cementpép formában a z R4 és az R5 keverékek rendelkeztek. Ez igaz volt a savkorróziós vizsgálatok utáni – maradó – szilárdságaikra is.
- Az abráziós folyamatokat szimuláló kísérleteink során megállapítottuk, hogy az abráziós hatás leginkább a kénsavas közegben volt hatással az eredményekre, amit a felületre kikristályosodó gipsz eltávolítása, és ezzel a gipszréteg késleltető hatásának megszüntetése indokolhat.
- Az ecetsavas kísérletnél is megfigyelhető az abráziós hatás szilárdságcsökkentő hatása.
- A tejsav kivételt képez, mivel az abráziós hatás nem okozott egyértelmű szilárdságcsökkenést vagy javulást.
- Az abráziósan végzett savas hatások értékelésével megállapítottuk, hogy a „fiatalabb” (savazás kezdete 28 napos korban) próbatestekre nagyobb hatással voltak, mint a későbbi korban (savazás kezdete 182 napos korban).
- Megfigyeltük, hogy a tejsavas kezelés hatására több keverék szilárdsága is emelkedett, amit a pórusokat kitöltő Ca-laktát kicsapódás következményének vélünk.
- Megfigyeltük, hogy összefüggés van a kloridionbehatolás és a látszólagos porozitás között. A nagyobb porozitás általánosan mélyebb kloridion behatolást jelentett. Ez alól kivételt jelentett az R3-as keverék. Ezt a kohósalak kloridion megkötő képességének tulajdonítható

- Az R3-as keverék rendelkezik a higanypenetrációs porozimetria vizsgálat eredményei alapján a legnagyobb összporozitással és fajlagos felülettel is, és a jellemző pórustartománya emellett nem jelentősen különbözik a többi keverékétől. Ezzel szemben a relatív nyomószilárdsága savkezelés után nem mutatott kiemelkedően gyenge értékeket.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy kísérleteinkhez a szükséges laboratóriumi és személyi hátteret biztosította. Köszönetet mondunk Rónaki Viktóriának, Takács Krisztiánnak, Szijártó Annának és Tímár Tamásnak. Köszönetet mondunk továbbá az NVKP_16-1-2016- 0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. Ezúton szeretnénk köszönetet mondani konzulenseinknek, Dr. Kopecskó Katalinnak és Dr. Balázs L. Györgynek, akik a kísérleti munka és a konzultációink során hasznos tanácsokkal láttak el.

Cementkötésű anyagok kémiai ellenállóképességének vizsgálata, a módszerek átfogó összehasonlítása

(TDK dolgozat, 2020)

Somlai Bálint

Konzulensek: Dr. Kopecskó Katalin, Dr. Balázs L. György

Összefoglalás

Kísérletsorozatunk célja volt a betonok kémiai ellenállóképességének meghatározására létrehozott vizsgálatok, és az azok eredményességét mérő módszerek megismerése. Ennek érdekében létrehoztunk olyan vizsgálati módszereket, amelyeken tanulmányozható volt több paraméter hatása is a vizsgálatokra nézve, és ezek alapján el tudtuk dönteni, mely vizsgálatokat mire érdemes használni. Ezen kívül több mérési módszert is alkalmaztunk, hogy eldönthessük melyek alkalmazása, milyen esetekben lehet célszerű. Összefoglalva a következőket tapasztaltuk:

- Elmondhatjuk, hogy az abráziós hatás és a sav koncentrációjának növelése jelentősen gyorsíthatják a vizsgálatokat, ezzel alkalmasabbá téve őket az ipari felhasználásra.
- A statikus vizsgálataink általánosan kisebb változásokat mutattak, mint a gép vizsgálatok, így ezeknél érdemes lehet a sav koncentrációt vagy a kontakt felületet növelni.
- A kézzel végzett abráziós vizsgálatok eredményessége alul maradt a gépek által végzettekkel szemben, így ezen vizsgálatokat kevésbé tartjuk alkalmasnak még a viszonylag hosszúnak tűnő, 12 hetes vizsgálati időtartam esetében is.
- A forgó savkorróziós készülékekkel végzett vizsgálatok voltak a leggyorsabban elvégezhetőek, a legjobban mérhető eredményekkel, míg a folyadéksugaras készülékkel végzett vizsgálat további kísérleteket igényel. Jelen adatok szerint utóbbit hosszú távú vizsgálatokhoz, valamint a savkorrózió modellezéséhez adatgyűjtésre javasoljuk.
- A tömegváltozást, valamint a behatolási front vizsgálatát egyszerűségük és gyorsaságuk miatt alkalmasnak tartjuk ipari használatra, ám meg kell jegyezni, hogy egyik sem megbízható önmagában.
- Az elektronmikroszkópiát idő- és szakképzett munkaerő igénye, valamint költségessége miatt csak kutatási célokra ajánljuk.

- A CT-vel végzett vizsgálatok a betonok vizsgálatában még mindig újdonságnak számítanak. A módszer önmagában használhatóságáról nem tudtunk megfelelően megalapozott véleményt alkotni. A vizsgálati eredmények alapján a vizsgálatot hasznos kiegészítő értékelésnek tekinthetjük a korróziós jelenségek leírásárban. Összességében a CT-vel végzett vizsgálatok hasznos kiegészítői lehetnek a savkorróziós vizsgálatoknak a jövőben, mivel elvégezhetők a korróziós vizsgálatok közben is, ezzel lehetőséget nyitva az időbeli folyamatok egyszerűbb és pontosabb megfigyelésére.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy kísérleteimhez a szükséges laboratóriumi és személyi hátteret biztosította. Köszönetet mondok Rónaki Viktóriának, Kovács Marcellnak, Szijártó Annának és Salem G Nehme-nek. Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016- 0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózionak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Kopecskó Katalinnak és Dr. Balázs L. Györgynek, akik a kísérleti munka és a konzultációink során hasznos tanácsokkal láttak el.