

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR**

**ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK**

**KÜLÖNLEGES BETONOK TULAJDONSÁGAINAK  
HATÁSA A HÚZOTT RÖGZÍTŐELEM  
VISELKEDÉSÉRE**

**TÉZISFÜZET**

**HLAVIČKA VIKTOR**

okl. szerkezet-építőmérnök

tudományos vezető:

dr. Majorosné dr. habil. Lublőy Éva Eszter  
egyetemi docens

Budapest, 2019

## Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS .....	2
1.1	Értekezés célkitűzései .....	2
1.2	Kutatás jelentősége .....	3
2.	KUTATÁS MÓDSZERTANA .....	3
2.1	Vizsgált rögzítőelemek .....	3
2.2	Kihúzóvizsgálatok .....	3
2.3	Betonnal kapcsolatos anyagvizsgálatok .....	6
3.	HAGYOMÁNYOS BETONOK TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A HÚZOTT RÖGZÍTŐELEMÉK JELLEMZŐIRE .....	6
3.1	Leszorítás nélküli kihúzóvizsgálatok eredményei .....	7
3.2	Leszorított kihúzóvizsgálatok eredményei .....	8
4.	SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETONOK TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A HÚZOTT RÖGZÍTŐELEMÉK JELLEMZŐIRE .....	9
4.1	Betonkeverékek .....	9
4.2	Kihúzóvizsgálatok .....	10
5.	TŰZKÁROSODOTT BETONOK TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A HÚZOTT RÖGZÍTŐELEMÉK JELLEMZŐIRE .....	13
5.1	Betonkeverék .....	13
5.2	Hőterhelés .....	13
5.3	Kihúzóvizsgálatok .....	15
5.3.1	Ragasztók tapadása tűzkárosodott betonban .....	15
5.3.2	Ragasztott rögzítések kúpszerű kiszakadása tűzkárosodott betonban.....	16
5.4	Teherbírási meghatározása .....	17
5.5	Inverz módszerrel meghatározott csökkentő tényezős eljárás.....	19
6.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI.....	23
7.	KITEKINTÉS.....	23
8.	ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA.....	24
9.	IRODALOM JEGYZÉK.....	25

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban a rögzítéstechnika hatalmas fejlődésen megy keresztül. Az elvárások fokozatosan nőnek, mind a teherbírás, mind az igényes és esztétikus kialakítások terén. Mindezen követelményeket a gyártóknak a legkülönbözőbb fogadóanyagok (úgy mint beton, kisméretű tömör téglá, vázkerámia, pórusbeton, vagy üveg) esetén is teljesíteniük kell. A kapcsolatoknak egyúttal meg kell felelniük az építőipar által támasztott legújabb követelményeknek is, mint például tűzállóság, tartósság vagy szeizmikus hatásokkal szembeni ellenállás. Mindezek mellett a rögzítés kialakításának egyszerűnek és gyorsnak kell lennie, hogy minél jobban alkalmazkodjon az építkezések üteméhez.

Már önmagában beton fogadóanyag esetén is számos speciális kérdéssel találkozunk, mivel a betontechnológia és a rögzítéstechnika is dinamikusan fejlődő kutatási irány, számos új anyag, termék jelenik meg a piacon és a figyelembe veendő hatások köre is bővül. Az új termékek kibocsátásakor megfelelő minőségbiztosítás történik, a gyártók tervezési segédletekkel is segítik a tervezők munkáját. A gyors fejlődés miatt azonban sem a segédletek, sem az ezeken túlmutató, összefoglaló szabványok sem képesek minden kérdéskört lefedni, így az ezzel kapcsolatos kutatások nagy fontosságúak.

A rögzítéstechnika utóbbi években való gyors fejlődését és a téma aktualitását jól tükrözi, hogy sokáig nem létezett egységesített európai szabvány a teherbírás meghatározására. Azonban 2018-ban elfogadásra került az EUROCODE betonszerkezetekkel foglalkozó fejezetének 4. szakasza [1], ami a rögzítőelemek teherbírásának méretezését teszi lehetővé. A szabvány magyarországi átvétele 2019 januárjában valósult meg [2]. A szabvány alapja a rögzítéstechnikai elemeket gyártó cégek egységesített minőségbiztosítási eljárása [3], [4], aminek vizsgálati módszereire és eredményeire továbbra is sokat hivatkozik az új szabvány.

A disszertációmban szálerősítésű, illetve hőterhelt betonokba elhelyezett rögzítőelemeket vizsgállok, a két vizsgált betontípust nevezem összefoglalóan különleges betonoknak. Mindkét betontípus vizsgálata aktuális probléma, mivel a szálerősítés kiemelten fejlődő alkalmazási irány, a tűzállóság és a tűzkárosodást követően a szerkezet megerősítésének lehetősége pedig hangsúlyos méretezési kérdés.

### 1.1 Értekezés célkitűzései

Doktori kutatásom során célt volt olyan nem hagyományos betonokban elhelyezett rögzítőelemek viselkedésének elemzése, amikre nem térnek ki a méretezési eljárások és szabványok. A kutatás során olyan a hagyományos betonoktól eltérő tulajdonságokat és paramétereket vizsgáltam, amik hatással vannak a rögzítőelemek teherbírására és tönkremeneteli módjaira.

Kutatásom elején három eltérő tulajdonságú különleges betont (szálerősítésű, könnyű adalékanyagos és tűzkárosodott beton) és az abban elhelyezett rögzítések viselkedését elemeztem húzó igénybevétel hatására, azonban tézisértékű eredmény csak a szálerősítésű betonokban és a tűzkárosodott betonban elhelyezett rögzítések elemzéséből született, így csak az ezekkel kapcsolatos eredmények kerültek be a disszertációba.

## 1.2 Kutatás jelentősége

A szabvány és a korábbi ajánlások is csak hagyományos betonban (hagyományos beton alatt értem a kavics, homok vagy zúzottkő adalékanyag felhasználásával készült betonokat, amiknek testsűrűsége 2000-2700 kg/m<sup>3</sup>, és nyomószilárdsága nem haladja meg a 70 N/mm<sup>2</sup> értéket) elhelyezett rögzítések teherbírását határozza meg, ezért nagy fontossággal bírnak az olyan kutatások, amik tágítják a szabványban megfogalmazott határokat. Az így kapott eredményekkel segíteni szeretném a méretezési háttér bővítését, segítve ezzel a tervezőmérnökök munkáját.

## 2. KUTATÁS MÓDSZERTANA

### 2.1 Vizsgált rögzítőelemek

A kutatás során az iparban legelterjedtebb nyomaték-kontrollált terpesztett csapot, illetve a leggyakrabban használt kétféle ragasztóval (epoxi, illetve vinilészter-hibrid) kialakított rögzítés viselkedését elemeztem.

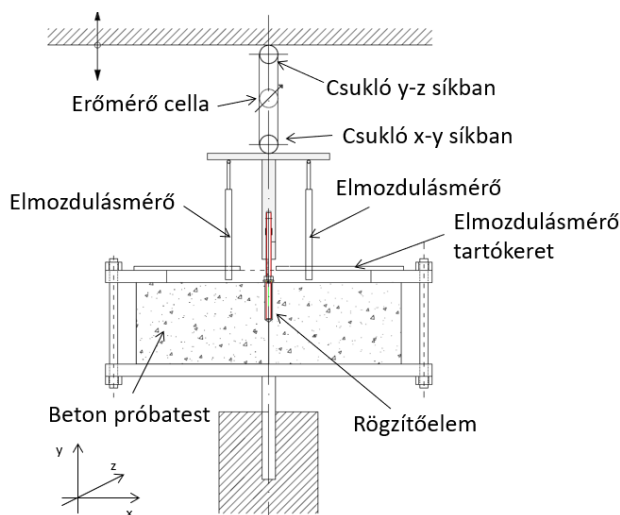
A vizsgálataimban alkalmazott terpesztett csap egy nagyteljesítményű feszítődübel, amely galvanizált, rozsdamentes acélból készült. Alkalmazása első sorban repedésmentes szerkezetekben javasolt. A rögzítőelemen a technológiai kialakításból adódóan egy keresztmetszet szűkítés található, ami lehetővé teszi a befeszülést elősegítő köpeny elhelyezését. A terpesztett csap nyomaték-kal való megfeszítéskor a köpeny lecsúszik a szár alsó, kónikus kialakítású részére, ezért szétnyílik és a rögzítőelem nekifeszül a furat falának, létrehozva ezzel a súrlódás révén történő erőátvitelt. A vizsgálatnál használt rögzítőelem keresztmetszete M8 (d = 8 mm átmérőjű) volt [5]. Ragasztott kapcsolatoknál az általam alkalmazott menetesszár M8 méretű volt, amihez 10 mm átmérőjű furatot kellett készíteni. A szélesebb furat biztosítja, hogy a ragasztó teljes felületében körbe tudja venni a menetesszárát. A vizsgálatoknál használt menetesszár anyagminősége 10.9 (szakítószilárdság karakterisztikus értéke:  $f_{u,k} = 1000 \text{ N/mm}^2$ , folyáshatár karakterisztikus értéke:  $f_{y,k} = 900 \text{ N/mm}^2$ ) volt. A választott nagy szakítószilárdság oka az volt, hogy a szárszakadás, mint tönkremenetel ne következhesse be a kihúzóvizsgálatoknál. Az első alkalmazott ragasztó típusa nagyteljesítményű kétkomponensű epoxi ragasztó. A rögzítés feszültségmentes, így kis perem- és tengelytávok esetén is használható. Az epoxi ragasztó konzisztenciája sokkal nagyobb, mint más ragasztóké, így be tud hatolni a beton pórusaiba és el tud érni egy megfelelő mélységet mielőtt megszilárdulna, ezzel növelve az adhézió által közvetített teherátadást [6]. A második alkalmazott ragasztó kötőanyaga vinilészter-hibrid, ami egy kombinált ragasztó. Ez a típusú ragasztó szerves (vinilészter) és szervetlen (cement) összetevőket is tartalmaz. A rögzítés feszültségmentes, így kis perem- és tengelytávok esetén is használható [7].

### 2.2 Kihúzóvizsgálatok

A kihúzóvizsgálatok elvégzéséhez minden esetben elmozdulás-vezérelt gépet használtam. Az elmozdulás-vezérlés lehetővé tette, hogy a tönkremenetel után a kapcsolat teherbírásának leszálló ága és a maradó teherbíráshoz tartozó elmozdulás is meghatározható legyen. A húzás sebessége a vizsgálatoknál egységesen 1 mm/perc volt, ami kvázi statikus terhelésnek felelt

meg, kiküszöbölve ezzel a dinamikus terhelésből származó többletterherbírás hatását [8]. Kutatásom során a rögzítéseket leszorítás nélküli és leszorított összeállításban is vizsgáltam.

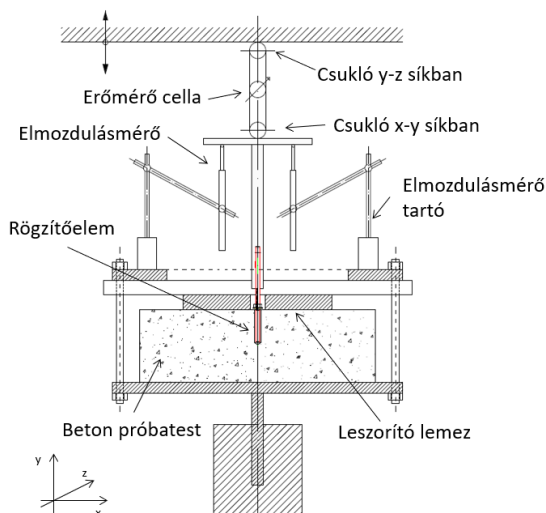
A leszorítás nélküli vizsgálatoknál alkalmazott rögzítési mélység 50 mm volt. A Tanszéken elvégzett korábbi vizsgálatok megállapították, hogy az 50 mm-es mélységhez tartozó eredményekből levont következtetések alkalmazhatók nagyobb rögzítési mélységekre is [9]. Mivel a rögzítési mélység meghatározza a beton próbatest minimális méreteit, az 50 mm-es rögzítési mélységhez tartozó vizsgálatokhoz 300·300·100 mm majd 300·300·150 mm élhosszúságú téglatest alakú próbatesteket választottam. Az így kapott próbatestek megfeleltek a minimális geometriai követelményeknek [3]. A vastagságban való változtatást a beton próbatestek felhasadásának elkerülése indokolta. A leszorítás nélküli kihúzóvizsgálatokban (2.1. ábra) biztosítani kellett a próbatest befogását úgy, hogy a szakadókúp szabadon létrejöhessen. Ehhez egy olyan 20 mm vastag acéllemezt használtam, ami 250 mm átmérőben szabadon hagyta a rögzítőelem környezetét. Ez megfelelt a rögzítőelemek minősítésénél használt mérési összeállításnak [3].



2.1. ábra: Leszorítás nélküli kihúzóvizsgálat sematikus és a megvalósult mérési összeállítása

A leszorított kihúzóvizsgálat (2.2. ábra) esetén csak a rögzítőelem kihúzódása valósulhat meg. Ez a fajta mérési összeállítás teszi lehetővé a ragasztott rögzítések tapadószilárdságának vizsgálatát. A leszorított kihúzóvizsgálat összeállításában egy 2 cm vastag acéllemezt használtam, ami egy 2 cm átmérőjű lyukon kívül leszorította a rögzítőelem környezetét. Ez megfelel a rögzítőelemek minősítésénél használt mérési összeállításnak [3]. A leszorított kihúzóvizsgálatoknál alkalmazott rögzítési mélység 40 és 50 mm volt. Ennél a vizsgálatnál is 300·300·150 mm élhosszúságú beton próbatesteket használtam. Mivel ez a fajta vizsgálat nem igényel ekkora próbatest méretet, itt 4 rögzítés is elhelyezhető volt egy próbatestben, a széltől mért 115 mm távolságban.

A kihúzóvizsgálatok kiértékelése során a mért eredményeket összevettem a hagyományos betonban elhelyezett rögzítések számítási módszereivel, hogy megfigyelhessem a különleges betonok tulajdonságainak teherbírásra gyakorolt hatását.



2.2. ábra: Leszorított kihúzóvizsgálat sematikus és a megvalósult mérési összeállítása

Mechanikus rögzítések esetén a rögzítőelem kihúzóadásához tartozó határértéket nem szükséges vizsgálni, mivel ezeknél a rögzítőelem fajtáknál a szár kihúzóása a rögzítési eljárások betartása mellett nem jöhet létre [3]. Ragasztott kapcsolatok esetén viszont a szár kihúzóása jellemző tönkremeneteli mód és a következő összefüggéssel határozható meg:

$$N_{u,p} = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot \tau_u, \quad (2.1)$$

ahol:

- $d$  a szár átmérője [mm],
- $h_{ef}$  a rögzítési mélység [mm],
- $\tau_u$  a ragasztó tapadószilárdsága [N/mm<sup>2</sup>].

A (2.1) képlet akkor használható, ha  $4 \leq h_{ef}/d \leq 20$ ,  $d \leq 50$  mm [1], [3], [4], [10].

A beton kúpszerű kiszakadásának leírására a legelterjedtebb módszer a CC-Method (Concrete Capacity Method). A tönkremenetelhez tartozó teherbírás leírásának alapja az alábbi törésmechanikai összefüggés [11]:

$$N_{u,c}^0 = 2.1 \cdot (E_c \cdot G_f)^{0.5} \cdot h_{ef}^{3/2}, \quad (2.2)$$

ahol:

- $h_{ef}$  a rögzítési mélység [mm],
- $E_c$  a beton rugalmassági modulusa [N/mm<sup>2</sup>],
- $G_f$  a beton törési energiája [N/mm].

A kiindulási számításokat később kísérleti eredmények alapján pontosították [12]–[15]:

$$N_{u,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{c,200}} \cdot h_{ef}^2 \cdot \frac{1}{h_{ef}^{0.5}} = k_1 \cdot \sqrt{f_{c,200}} \cdot h_{ef}^{1.5}, \quad (2.3)$$

ahol:

- $k_1$  a rögzítőelem típusától függő tényező [N<sup>0.5</sup>/mm<sup>0.5</sup>],
- $h_{ef}$  a rögzítési mélység [mm],
- $f_{c,200}$  a beton nyomószilárdsága 200 mm élhosszúságú kockán mérve [N/mm<sup>2</sup>],  
( $\sqrt{f_c} \approx f_{ct}$  [16]),
- $f_{ct}$  a beton húzószilárdsága [N/mm<sup>2</sup>].

A (2.3) összefüggésben a  $h_{ef}^2$  a betonban kialakuló húzott felület közelítése, míg az  $1/h_{ef}^{0.5}$  tényező a mérethatást veszi figyelembe [17]. A módszer újdonsága a megelőző számítási

metódusokhoz képest [18], hogy a szakadókúp kialakulását kísérleti adatok alapján 35°-os szöggel veszi figyelembe (ellentétben az addig feltételezett 45°-os szöggel). Napjainkban több méretezési segédlet és szabvány is ezt a képletet javasolja [1], [3], [10], [19], [20]. A felsorolt segédletek és szabványok sok esetben csak a  $k_1$  tényező értékében térnek el.

### 2.3 Betonnal kapcsolatos anyagvizsgálatok

A beton próbakockák nyomószilárdság vizsgálatát (2.3. ábra bal) a használatos szabvány [21] alapján végeztem, a keveréstől számított minimum 28 napos korban, a kihúzókérdésekkel egy időben. A rögzítőelemek teherbírásának számolásánál gyakran a 200 mm élhosszúságú kockán elvégzett nyomószilárdsági értékekre van szükség. A 150 mm élhosszúságú kockához tartozó nyomószilárdságról ( $f_{c,150}$ ) a 200 mm élhosszúságú kocka nyomószilárdsági értékére ( $f_{c,200}$ ) való átszámításhoz a következő képletet használtam [22]:

$$f_{c,150} = 1,06 \cdot f_{c,200}. \quad (2.4)$$

A hajlító-húzószilárdság mérését (2.3. ábra közép) 70·70·250 mm-es hasábokon végeztem el, a keveréstől számított minimum 28 nap után, a kihúzókérdésekkel egy időben. A vizsgálat a hatályos szabvány [23] alapján készült. A beton hajlító-húzószilárdságát kiegészítve az elkészített próbatesteken hasító-húzószilárdság vizsgálatot (2.3. ábra jobb) is végeztem a hatályos szabvány [24] alapján. A vizsgálatához hengeres próbatestet használtam, aminek átmérője 150 mm és magassága 150 mm volt. A látszólagos porozitás vizsgálat szintén a hatályos szabvány [25] alapján készült.



2.3. ábra: A betonkeverékekkel kapcsolatban elvégzett nyomószilárdság, hajlító-húzószilárdság és hasító-húzószilárdság vizsgálatok összeállítása

## 3. HAGYOMÁNYOS BETONOK TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A HÚZOTT RÖGZÍTŐELEMENK JELLEMZŐIRE

Ahhoz, hogy elemezni tudjam rögzítőelemek különleges (szálerősítésű, illetve hőterhelt) betonokban való viselkedését előbb hagyományos betonokban elhelyezett rögzítéseket vizsgáltam referenciaként. A kapott eredményeket irodalmi adatokkal összevetve ellenőrizni tudtam az alkalmazott mérési összeállítások megfelelőségét, továbbá ezen vizsgálatok

eredményei szolgálták etalonként a további vizsgálatokhoz. Kutatásom során hagyományos betonok esetén összesen 109 db kihúzóvizsgálatot végeztem el.

Hagyományos betonokból összesen kilenc különböző receptúrát vizsgáltam (3.1. táblázat), a próbatetek összesen 12 darab, különböző időpontban történt keverés során készültek. Hagományos betonok esetén a vizsgált legkisebb nyomószilárdság ( $f_{c,150}$ ) 32,82 N/mm<sup>2</sup>, a legnagyobb nyomószilárdság ( $f_{c,150}$ ) 77,76 N/mm<sup>2</sup> volt. Ebből látható, hogy vizsgálataim egy széles szilárdsági tartományt fedtek le a napjainkban használt hagyományos betonok körében.

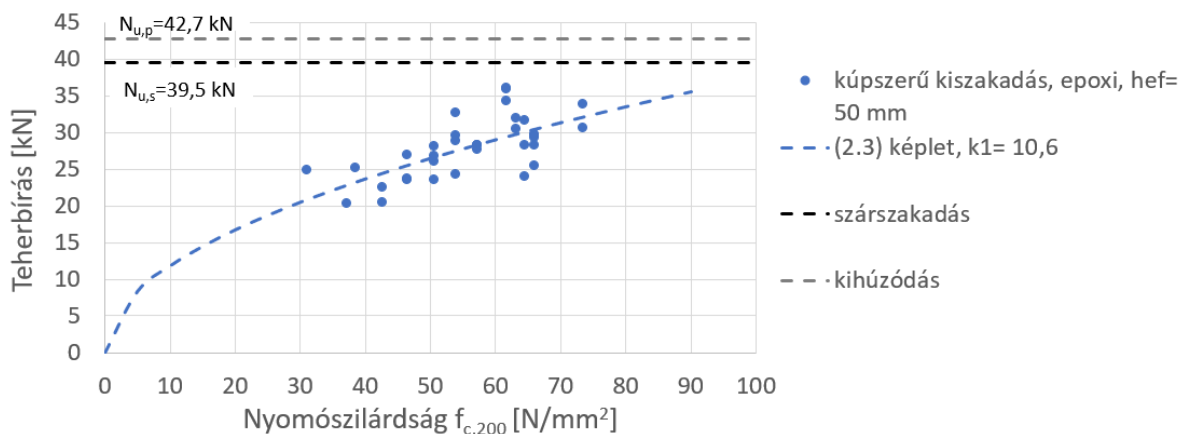
### 3.1. táblázat: Alkalmazott betonreceptúrák

Receptúra	Adalékanyag [kg/m <sup>3</sup> ]			Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Víz [kg/m <sup>3</sup> ]	Adalékszer [kg/m <sup>3</sup> ]
	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm			
I.	833	463	555	410	152	6,2
II.	833	463	556	390	160	3,9
III.	833	463	555	365	170	2,6
IV.	834	463	556	310	189	0,62
V.	833	463	556	290	196	0,58
VI.	844	469	563	300	180	0,6
VII.	812	451	542	380	180	1,5
VIII.	776	431	517	380	211	0,8
IX.	878	488	585	300	150	2,1

### 3.1 Leszorítás nélküli kihúzóvizsgálatok eredményei

Terpesztett horgonycsapok vizsgálata esetén a jellemző tönkremenetel szárszakadás volt. Ennek oka az alkalmazott horgonycsap acélminősége ( $f_{u,k}=400$  N/mm<sup>2</sup>) és a kialakításból adódó elvékonyított szár (átmérő 7,1 mm) a szoknya elhelyezésétől. A szárszakadáshoz tartozó átlagos teherbírás 17,46 kN-ra adódott.

Epoxi ragasztóval kialakított rögzítések esetén mind a 12 keveréknél a jellemző tönkremenetel a beton kúpszerű kiszakadása volt. A mérések egyéni értékeit a nyomószilárdság függvényében a 3.1. ábra szemlélteti.

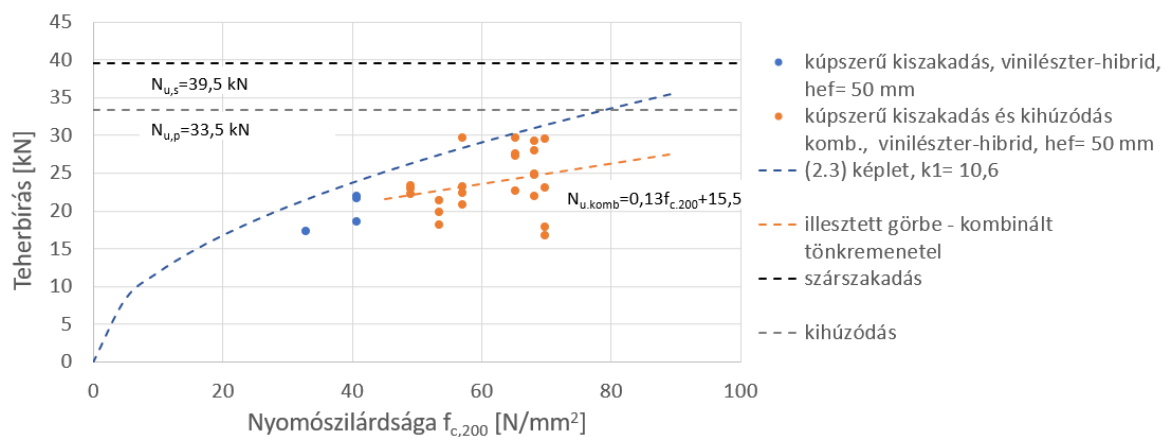


3.1. ábra: A beton kúpszerű kiszakadáshoz tartozó teherbírás értékek a nyomószilárdság függvényében epoxi ragasztóval kialakított rögzítések esetén ( $h_{ef}=50$  mm)



A kihúzóvizsgálat mérési eredményeire jól illeszthető a (2.3) formula abban az esetben, ha  $k_1=10,6$ . Az így kapott  $k_1$  értéke megfelel a szabványok, méretezési segédletek által is megállapított értékeknek. Ebből adódóan megállapítható, hogy az alkalmazott mérési összeállítás megfelel az előírtaknak, továbbá vizsgálataimmal megerősítettem azt a feltételezésemet is, hogy az 50 mm-es mélységhez tartozó eredményekből levont következtetések alkalmazhatók nagyobb rögzítési mélységekre is.

Vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések esetén a jellemző tönkremenetel a beton kúpszerű kiszakadása és a rögzítés kihúzódásának kombinációja volt. Tisztán szakadókúpos tönkremenetel csak két keverék esetén következett be. A 3.2. ábra szemlélteti a mért teherbírasi értékeket a nyomószilárdság függvényében, továbbá az ábrán látható a tiszta kúpszerű kiszakadás teherbírásának tendenciája is.



3.2. ábra: A beton kúpszerű kiszakadásához és a kombinált tönkremenetelhez tartozó teherbírasi értékek a nyomószilárdság függvényében vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések esetén ( $h_{ef}= 50$  mm)

### 3.2 Leszorított kihúzóvizsgálatok eredményei

Mivel a ragasztók tapadószilárdsága csak kismértékben függ a beton szilárdságától [26], ezért hagyományos betonok esetén a ragasztók tapadásának vizsgálatát csak egy betonkeveréken végeztem el. A leszorított kihúzóvizsgálatoknál a rögzítési mélység 40 és 50 mm volt. A tapadószilárdság meghatározásához rögzítési mélységenként 3-3 kihúzóvizsgálatot alkalmaztam.

Az epoxi ragasztóval kialakított rögzítések vizsgálata során az 50 mm-es rögzítési mélységnél az acélszál szakadása következett be, tehát ebben az esetben a kihúzódáshoz tartozó teherbírás meghaladta a szár szakítószilárdságából adódó teherbírasi értéket. A vizsgálatok többi részében a rögzítőelemek kihúzódtak, a tönkremenetel a ragasztó és a menetes szár között következett be. A tönkremenetelből adódóan a ragasztók tapadószilárdsága ( $\tau_u$ ) a (2.1) képlettel számítható. Az alkalmazott ragasztott kapcsolatok átlagos tapadószilárdságát a 3.2. táblázat foglalja össze.

3.2. táblázat: Az alkalmazott ragasztott kapcsolatok átlagos tapadószilárdsága

Ragasztott kapcsolat	Tapadószilárdság [N/mm <sup>2</sup> ]	Szórás [N/mm <sup>2</sup> ]
epoxi ragasztó + M8 menetes szár	33,97	1,81
vinilészter-hibrid ragasztó + M8 menetes szár	26,53	1,10

## 4. SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETONOK TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A HÚZOTT RÖGZÍTŐELEMÉK JELLEMZŐIRE

A betonban alkalmazott szálak hatással vannak a repedések kialakulására, és így a rögzítőelemek kúpszerű tönkremenetelére is. A szálak repedésáthidaló képességükkel befolyásolják a szakadókúp repedésének megnyílását, és a repedésterjedést. Az irodalmi beszámolókból látható [27]–[30], hogy a szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítőelemek teherbírásának meghatározása napjainkban egy igen fontos kutatási területté vált. Azonban a nyilvánosságra hozott eredmények több esetben is ellentmondásosak, ami további kérdéseket és kutatási irányokat vet fel a szálak rögzítőelemek teherbírására gyakorolt hatásával kapcsolatban.

### 4.1 Betonkeverékek

A szálerősítésű betonkeverékek elkészítéséhez a 3.1. táblázat III. és V. receptúráját módosítottam acél- és műanyagszálak (4.1. ábra) hozzáadásával. Az alkalmazott száladagolásokat és a szálak tulajdonságait a 4.1. táblázat foglalja össze. A szálak hozzáadása minden esetben hatással volt a keverékek konzisztenciájára, ezért az egységes konzisztencia (F4) eléréséhez szálerősítésű betonok esetén a kiindulási receptúrákhoz képest a hozzáadott folyósítószer mennyiségének növelésére volt szükség.

4.1. táblázat: A felhasznált szálak tulajdonságai és az alkalmazott száladagolás

Jelölés	Anyag	Hossz [mm]	Átmérő [mm]	Szakítószil. [N/mm <sup>2</sup> ]	Testsűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	Kialakítás	Vizsgált száladagolás	
							[kg/m <sup>3</sup> ]	[V%]
S1	acél	50	1,0	1000-1200	7850	sima felület, kampós vég	20, 30, 40, 80	0,25 0,38 0,51 1,02
S2	acél	12	0,2	3000	7850	sima felület, egyenes szál	40, 80	0,51 1,02
P	műanyag	50	0,5	618	910	dombornyomásos felület, egyenes szál	3, 4,5, 6	0,33 0,49 0,66



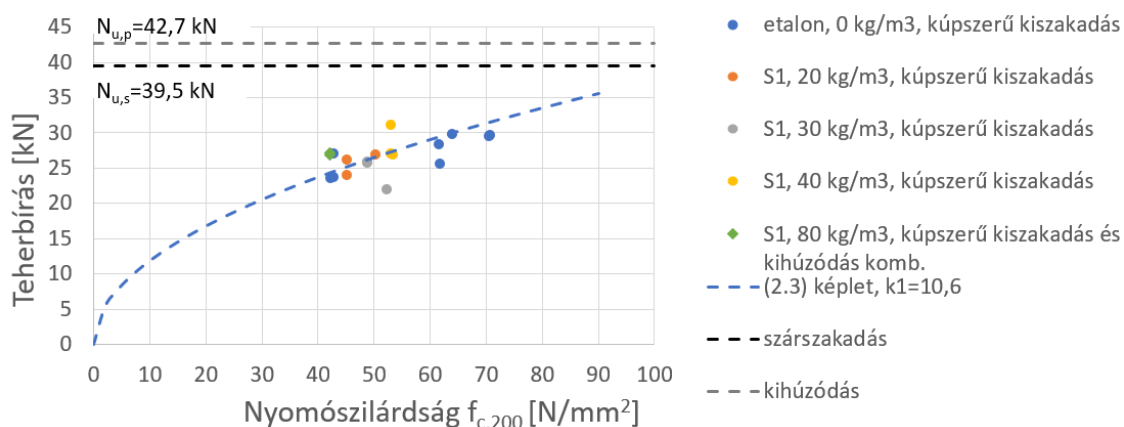
4.1. ábra: A vizsgálat során alkalmazott szálak

## 4.2 Kihúzóvizsgálatok

Szálerősítésű betonban elhelyezett rögzítések viselkedésének elemzésénél csak leszorítás nélküli kihúzóvizsgálatot alkalmaztam, mivel ez az összeállítás teszi lehetővé a rögzítések kúpszerű kiszakadásának vizsgálatát, amelyre a szálaknak elsődlegesen hatása lehet. A szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítőelemek teherbírásának elemzéséhez száltípusonként, száladagolásonként és betonszilárdságonként 3-3-3 db, összesen 113 db kihúzóvizsgálatot végeztem el.

A terpesztett horgonycsapok a vizsgálatok során minden esetben szárszakadással mentek tönkre. A tönkremenetelhez tartozó teherbírás értéke ebben az esetben is 17 kN körüli értékre adódott. Mivel a jellemző tönkremenetel szárszakadás volt és nem a beton kúpszerű kiszakadása, így ebben az esetben nem lehetett következtetést levonni a száltartalom közvetlen hatásáról.

A 4.2. ábra a kampós végű acélszál erősítésű betonban (S1) elhelyezett epoxi ragasztóval kialakított rögzítések egyedi teherbírás értékeit foglalja össze. Az eredményekből látható, hogy a  $80 \text{ kg/m}^3$  száladagolás mellett a rögzítés jellemző tönkremenetele kúpszerű kiszakadástól kombinált tönkremenetelre változott. Azonban a teherbírás értékekről elmondható, hogy az adott rögzítési mélység ( $h_{ef} = 50 \text{ mm}$ ) és az alkalmazott száltípus (S1) esetén nem tapasztalható teherbírás változás a hagyományos betonoknál mért teherbíráshoz képest a vizsgált száladagolások mellett ( $20, 30, 40, 80 \text{ kg/m}^3$ ).

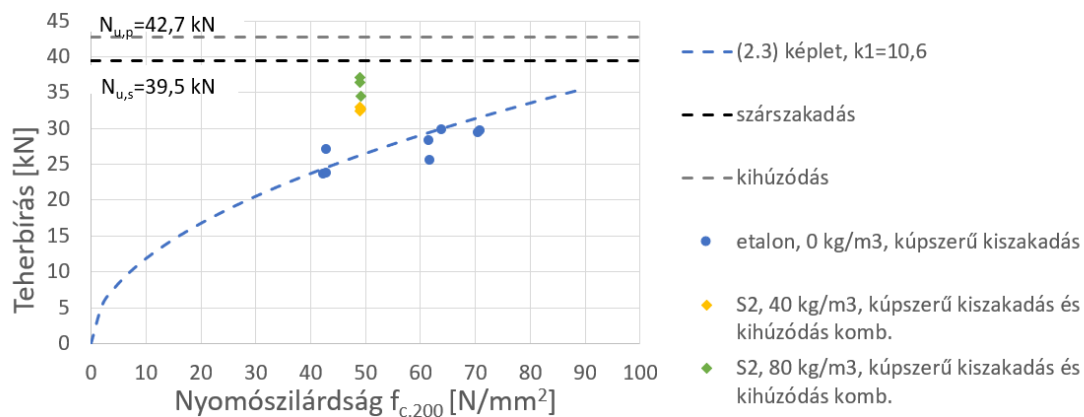


4.2. ábra: Epoxi ragasztóval kialakított rögzítések egyedi teherbírás értékei S1 acélszál erősítésű betonban a beton nyomószilárdságának függvényében ( $h_{ef} = 50 \text{ mm}$ )

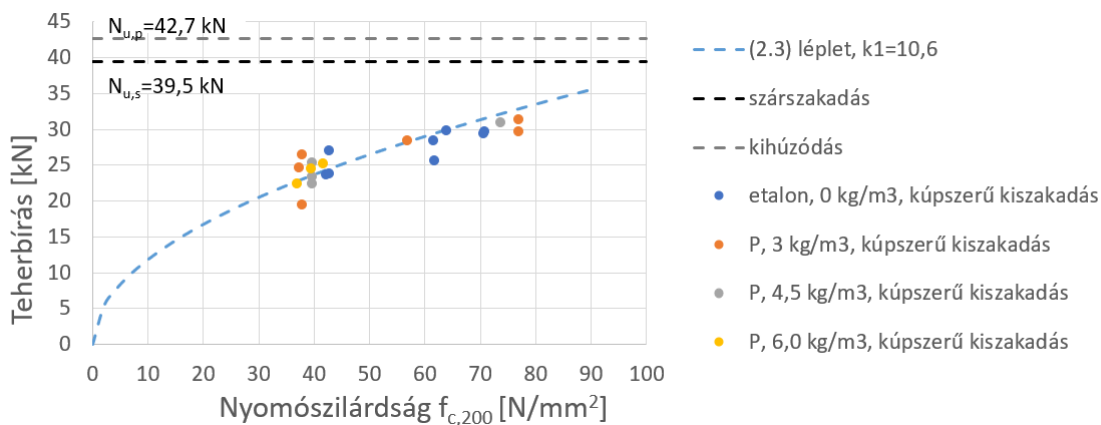
A 4.3. ábra a rövid egyenes acélszál (S2) erősítésű betonban elhelyezett epoxi ragasztóval kialakított rögzítések egyedi teherbírás értékeit foglalja össze. A tönkremenetelekből látható, hogy ebben az esetben már  $40 \text{ kg/m}^3$  száladagolás mellett is a tisztán kúpszerű tönkremenetel kombinált tönkremenetelre változik. Továbbá, mind a  $40 \text{ kg/m}^3$ , mind a  $80 \text{ kg/m}^3$  száladagolás esetén a teherbírás jelentős növekedése figyelhető meg. Ennek magyarázata, hogy a rövidebb és vékonyabb szálak esetén ugyanolyan száladagolás mellett fajlagosan sokkal több szál kerül bedolgozásra, ebből adódóan lényegesen több az olyan hasznos szál, ami részt vesz a kialakuló repedések megnyílásának korlátozásában.

Műanyagszálak esetén (P) a hozzáadott száltartalom hatására nem tapasztalható az epoxi ragasztóval kialakított rögzítések tönkremenetelének változása, sem a teherbírás növekedése

vagy csökkenése (4.4. ábra). Ez arra utalhat, hogy a kúpszerű kiszakadás esetén a szálak mennyisége mellett azok húzó-, hajlító-, és nyírómerevsége is fontos lehet, a műanyag szálak ezért nem tudtak az S2 acélszálakhoz hasonló teherbírás javulást előidézni.



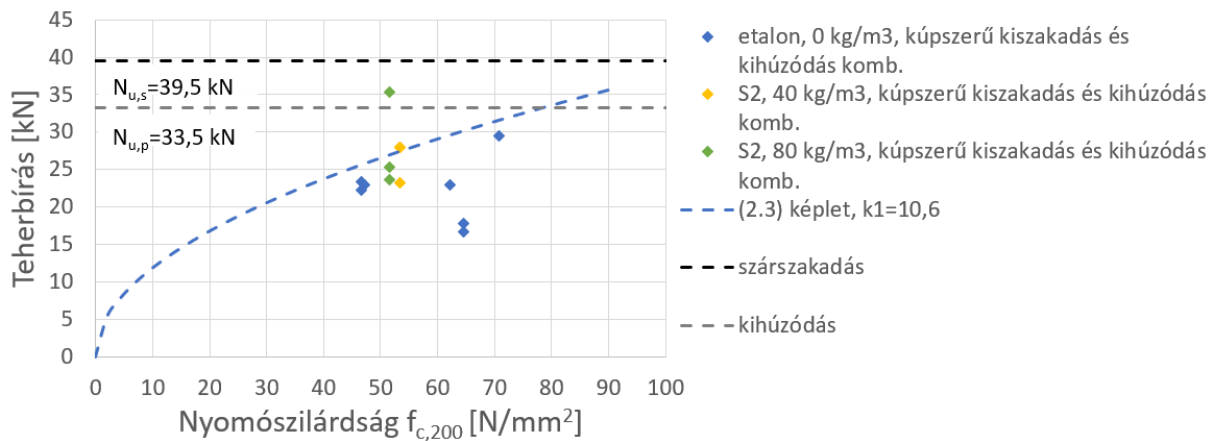
4.3. ábra: Epoxi ragasztóval kialakított rögzítések egyedi teherbírás értékei S2 acélszál erősítésű betonban a beton nyomószilárdságának függvényében ( $h_{ef}=50$  mm)



4.4. ábra: Epoxi ragasztóval kialakított rögzítések egyedi teherbírás értékei P műanyag szálerősítésű betonban a beton nyomószilárdságának függvényében ( $h_{ef}=50$  mm)

A kampós végű acélszál erősítésű betonban (S1) elhelyezett vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések tönkremeneteli formája és teherbírása nem változott a hagyományos betonokban elhelyezett rögzítésekhez képest a vizsgált száladagolások (20, 30, 40, 80 kg/m<sup>3</sup>) mellett.

A 4.5. ábra a rövid egyenes acélszál (S2) erősítésű betonban elhelyezett vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések teherbírását foglalja össze. Az eredményekből látható, hogy ellentétben az epoxi ragasztóval kialakított rögzítések esetén a vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítéseknél nincs hatása a száltartalomnak a teherbírásra. Ez első sorban annak köszönhető, hogy ezekben az esetekben a kúpszerű tönkremenetel és a kihúzóadás kombinációja következett be, így nem egy teljes mélységű kúp felületén, hanem csak egy lényegesen kisebb kúpfelületen áthaladó szálak tudtak aktivizálódni. A tönkremenetel az epoxi ragasztó esetén is kombinált jellegű volt, azonban lényegesen nagyobb mélységű (és így méretű) szakdókúp alakult ki, ami miatt a szálak jobban tudtak aktivizálódni.



4.5. ábra: Vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések egyedi teherbírás értékei az S2 acélszál erősítésű betonban a beton nyomószilárdságának függvényében ( $h_{ef}=50$  mm)

Műanyagszálak esetén (P) a hozzáadott száltartalom hatására nem tapasztalható a vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések tönkremenetelének változása, sem a teherbírás növekedése vagy csökkenése.

## 1. Téziscsoport: Ragasztott rögzítések viselkedése szálerősítésű betonban, húzó igénybevétel esetén [HV1], [HV2], [HV8], [HV9]

### 1.1 Tézis

**Kísérletileg igazoltam, hogy azonos rögzítési mélység és azonos száladagolás mellett acélszálak esetén a kisebb átmérőjű és rövidebb szálak nagyobb hatással vannak a teherbírásra, mint a nagyobb átmérőjű hosszabb szálak. A teherbírásban (50 mm rögzítési mélység és az általam vizsgált epoxi ragasztóval rögzített M8 menetes szár esetén) akár 1,4-szeres növekedés is tapasztalható, ami akár a tönkremeneteli mód változását is eredményezheti.** Ennek oka a szálak azonos száladagolás mellett is eltérő darabszáma. Azonos száladagolás mellett kisebb szálgeometria esetén jóval több szál kerül bedolgozásra, mint a nagyobb szálgeometriánál. Ebből adódóan potenciálisan több szál helyezkedik el a kialakuló repedés útjában, több szál vesz részt a repedésmegnyílás és a repedésterjedés megakadályozásában.

### 1.2 Tézis

**Kísérletileg igazoltam, hogy az 50 mm hosszú műanyag makro-szálak 50 mm-es rögzítési mélység esetén nincsenek hatással a rögzítőelemek teherbírására 3,0, 4,5, és 6,0 kg/m<sup>3</sup> száladagolás mellett, emiatt a hagyományos betonba való ragasztott rögzítésekkel kapcsolatos számítási formulák módosítás nélkül alkalmazhatók.**

Megjegyzés az 1.2 Tézishez: Az irodalmi adatok alapján látható, hogy eddig csak igen kevesen foglalkoztak műanyag szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítések viselkedésével. Az általam ismert kutatások közül csak egy vizsgálat [31] tért ki erre, ahol 50 mm hosszú műanyagszálat használtak 5,0 kg/m<sup>3</sup> száladagolásban, 90 mm rögzítési mélység mellett.

## 5. TŰZKÁROSODOTT BETONOK TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A HÚZOTT RÖGZÍTŐELEMENEK JELLEMZŐIRE

A rögzítőelemek tűzkárosult betonban való vizsgálata több oldalról is megközelíthető. A legáltalánosabb vizsgálatban a teljes kapcsolat kerül hőterhelés alá. Ekkor az acél rögzítőelem és a beton fogadóanyag (adott esetben a ragasztó is) együttesen van kitéve a hőmérséklet emelkedésének. A rögzítőelemek acélból készülnek, így sokkal gyorsabban átmelegszenek, ezzel bevezetve a hőt a közvetlen környezetükbe, felgyorsítva így a beton vagy adott esetben a ragasztó károsodását [32], [33]. Ragasztott kapcsolatok magas hőmérsékleten történő vizsgálatánál adott húzóigénybevétel mellett történik a hőmérséklet emelése [34], mivel ebben az esetben a ragasztók jelentős hőmérsékletérzékenysége miatt a ragasztó tönkremenetele és a rögzítés kihúzódása várható [35].

Egy másik megközelítési mód amikor a rögzítőelem már a beton hőterhelése után kerül elhelyezésre. Ez az eset kiégett épületek megerősítésénél (köpenyezésnél, gyámolításnál) fordulhat elő. Ebben az esetben:

- a rögzítőelem nem vezet be többlet hőt a beton szerkezetébe,
- a kapcsolat nincs kitéve magas hőmérsékletnek, így nem történik szilárdságvesztés az acél rögzítőelemben és adott esetben a ragasztóban sem.

A szakirodalomban található kísérletek alapján hőterhelést követően, utólag elhelyezett rögzítőelemek vizsgálata eddig csak alámetsző csapok alkalmazásával készült [36]. A korábbi kísérletek nem tértek ki más típusú rögzítések viselkedésére, így jelen kutatásban ragasztott kapcsolatokat alkalmaztam, hogy megvizsgáljam a ragasztott kapcsolat teherbírását és tönkremenetelét tűzkárosodott betonban.

### 5.1 Betonkeverék

A betonpróbatetek kialakításához egy fajta receptúrát alkalmaztam. Az alkalmazott receptúra azonos a *3.1. táblázat* V. receptúrájával. A laboratóriumi kísérletek során nem végeztem a későbbi számításokhoz szükséges húzószilárdság, rugalmassági modulus és törési energia méréseket, ezért ezen paramétereket a 150 mm élhosszúságú kockán mért nyomószilárdsági értékből számoltam az irodalomban fellelhető összefüggések alapján [10], [37], [38]. A beton mért és számított szilárdságai paramétereit a *5.1. táblázat* foglalja össze.

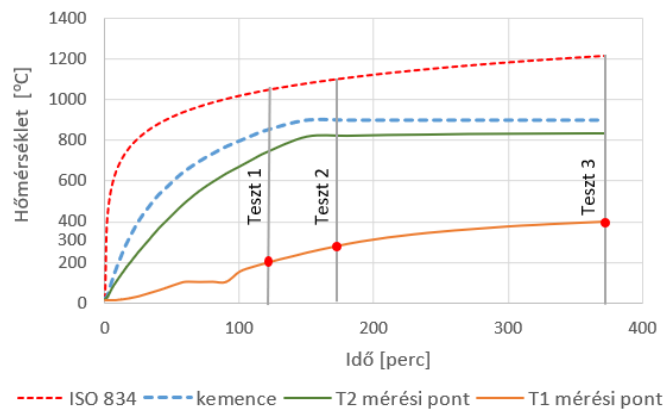
*5.1. táblázat: Beton szilárdsági paramétereit 20 °C-on*

<b>Nyomószilárdság (<math>f_{c,150}</math>):</b>	45,29	N/mm <sup>2</sup>
<b>Húzószilárdság (<math>f_{ct}</math>):</b>	3,81	N/mm <sup>2</sup>
<b>Rugalmassági modulus (<math>E_c</math>):</b>	35571	N/mm <sup>2</sup>
<b>Törési energia (<math>G_f</math>):</b>	0,09	N/mm

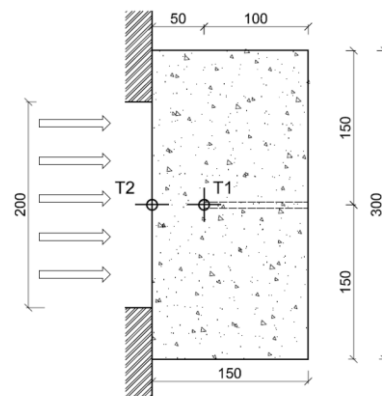
### 5.2 Hőterhelés

A laboratóriumi vizsgálatok során a beton próbateteket egyoldali hőterhelésnek tettem ki. A hőterheléshez elektromos kemencét használtam, aminek felfűtési görbét az *5.1. ábra* mutatja. A mérési adatok alapján megállapítható, hogy a kemence tűzgörbéje eltért a normál tűzgörbétől

[39], ezért a kísérlet nem nevezhető szabványos vizsgálatnak, ami azonban a levont következtetésekre nincs hatással.



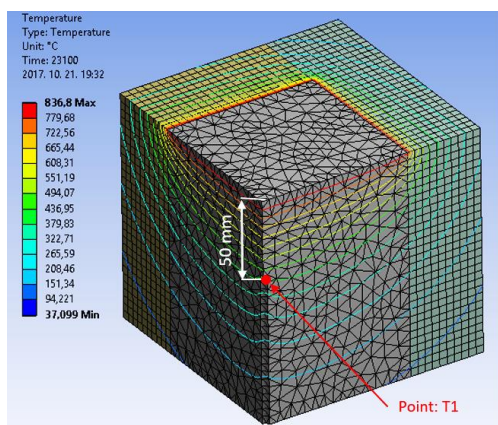
5.1. ábra: A különböző pontokban mért hőmérséklet alakulása a tűzterhelés alatt



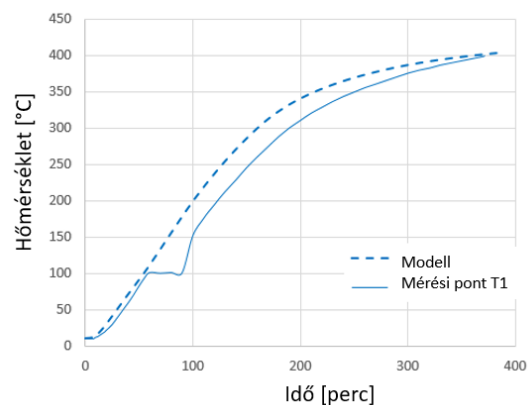
5.2. ábra: Hőterhelés mérési összeállítás

A rögzítési mélységben és a próbatest felületén a hőmérsékletet termoelemekkel mértem (5.2. ábra). Az 5.1. ábra diagramján látható, hogy a próbatest fokozatosan melegszik, a kemencétől eltérő, jelentősen lassabb tendenciával. 100 °C elérése után a hőmérséklet egy rövid ideig konstans, ekkor a betonban található víz vízgőzzé alakul és elkezd kiáramlani a betonból. Ekkor a hőmérséklet nem emelkedik, mivel a hőenergia teljes egészében a víz fázisátalakulására fordítódik.

A laboratóriumi kísérleteket kiegészítve numerikus hőtechnikai analízist is végeztem ANSYS Workbench 16.2 [40] végelemes programmal (5.3. ábra). Az elemzés célja a betonban kialakuló izoterma vonalak felvétele volt. A hőtechnikai modellezés során a program a tranziens hőtranszport parciális differenciálegyenletét oldja meg. A számításhoz szükség van a beton sűrűségére, hővezetési tényezőjére és fajhőjére, mint hőtechnikai jellemzőkre. A beton esetén ezen hőtechnikai paraméterek a hőmérséklet emelkedésével változnak. Felvételük irodalmi ajánlások alapján történt [41]–[43]. A modell validálásához a rögzítési mélységben mért hőmérsékletváltozást használtam. Az 5.4. ábra mutatja a laboratóriumi vizsgálatoknál a rögzítési mélységben mért és a hőtechnikai modellben számított hőmérsékletváltozás megfelelő egyezését.



5.3. ábra: Numerikus hőterjedés vizsgálat



5.4. ábra: A modell eredményeinek validálása a mért eredményekkel

### 5.3 Kihúzóvizsgálatok

A kihúzóvizsgálatokra a ragasztott rögzítések elhelyezése után 24 órával, a hőterhelés befejezése után 48 órával került sor. Kutatásom során epoxi ragasztóval és vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítéseket vizsgáltam tűzkárosodott betonban. Az 5.2. táblázat és az 5.3. táblázat a kihúzóvizsgálatok darabszámát foglalja össze a rögzítési mélységre vonatkoztatott hőmérséklet függvényében.

5.2. táblázat: Leszorított kihúzóvizsgálatok elemszáma

Teszt	Rögzítési mélység [mm]	Hőterhelés [perc]	Hőmérséklet a rögzítési mélységben [°C]	Epoxi ragasztó [db]	Vinilészter-hibrid ragasztó [db]
0	40	0	20	3	3
	50		20	3	3
1	40	120	240	3	3
	50		200	3	3
2	40	190	340	3	3
	50		300	3	3
3	40	370	450	3	3
	50		400	3	3
<b>Összesen</b>				<b>24</b>	<b>24</b>

5.3. táblázat: Leszorítás nélküli kihúzóvizsgálatok elemszáma

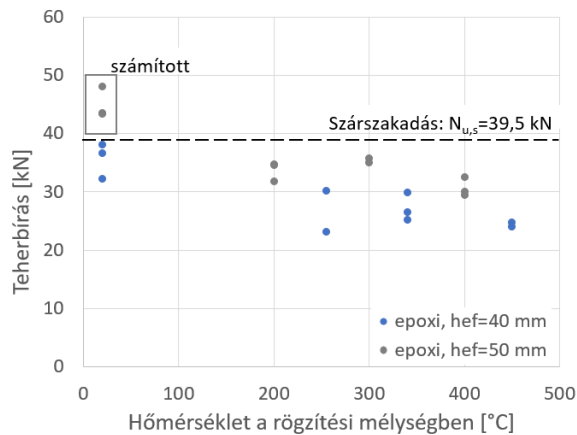
Teszt	Hőterhelés [perc]	Hőmérséklet a rögzítési mélységben [°C]	Epoxi ragasztó [db]
0	0	20	3
1	120	200	3
2	190	300	3
3	370	400	3
<b>Összesen</b>			<b>12</b>

#### 5.3.1 Ragasztók tapadása tűzkárosodott betonban (leszorított kihúzóvizsgálatok)

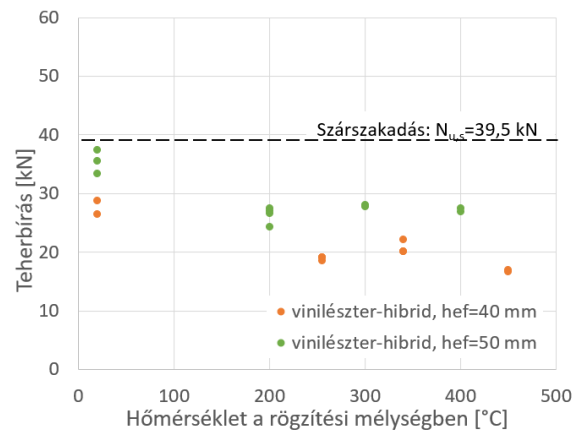
A leszorított kihúzóvizsgálatok esetén egy esetben (hőterhelés nélküli betonban epoxi ragasztóval 50 mm-es rögzítési mélységben kialakított rögzítés) szárszakadás következett be, a többi vizsgálatnál a rögzítőelem kihúzódott. Ahhoz, hogy az eredmények összehasonlíthatók legyenek, a szárszakadással járó esetekre számítás útján határoztam meg a kihúzóáshoz tartozó teherbírást a (2.1) képlet felhasználásával.

Az 5.5. ábra az epoxi ragasztóval kialakított rögzítések, az 5.6. ábra a vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések kihúzóáshoz mért teherbírás értékeket foglalja össze.





5.5. ábra: Epoxi ragasztóval kialakított rögzítések mért egyedi teherbírás értékei a rögzítési mélységben mért hőmérséklet függvényében (egyres pontok fedésben vannak)

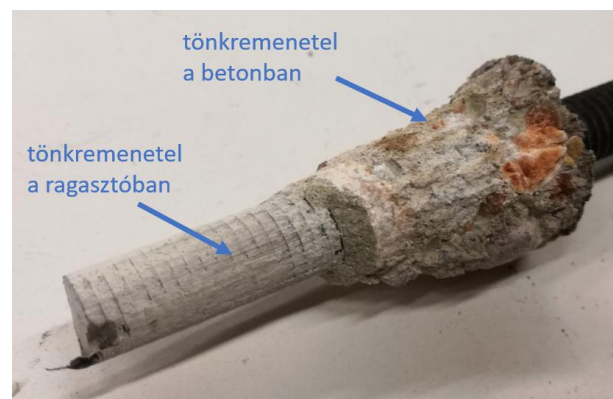


5.6. ábra: Vinilészter-hibrid ragasztóval kialakított rögzítések mért egyedi teherbírás értékei a rögzítési mélységben mért hőmérséklet függvényében (egyres pontok fedésben vannak)

A teherbírás csökkenő tendenciája egyértelműen magyarázható a kihúzott rögzítőelemek tönkremenetelével. Mind a három hőterhelés esetén a ragasztott rögzítőelemek kombinált kihúzódása következett be. A rögzítési hossz alsó szakaszán a ragasztó nyíródott el, míg a felső szakaszon a betonban történt tönkremenetel. Ezzel szemben a hőterhelés nélküli betonok esetén a kihúzódásnál csak a ragasztóban történt a tönkremenetel. A kombinált kihúzódás egy-egy jellemző alakját az 5.7. ábra és az 5.8. ábra szemlélteti. A betonban történt tönkremeneteli szakaszon látható, hogy az adalékszemek is elnyíródtak nem csak a cementkő. Ebből következtetni lehet arra, hogy a ragasztó és a beton között létrejött a megfelelő tapadószilárdság, azonban a beton a károsodásából adódóan nem tudta felvenni a közvetített terhet.



5.7. ábra: Kombinált kihúzódás epoxi ragasztó esetén hőterhelt betonban (Teszt1,  $h_{ef}=50$  mm)



5.8. ábra: Kombinált kihúzódás vinilészter-hibrid ragasztó esetén hőterhelt betonban (Teszt1,  $h_{ef}=50$  mm)

### 5.3.2 Ragasztott rögzítések kúpszerű kiszakadása tűzkárosodott betonban

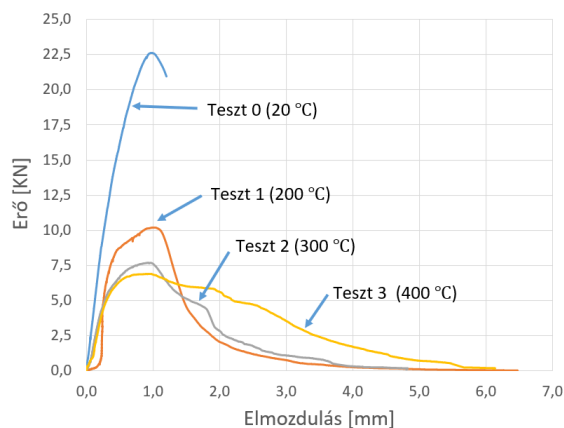
A leszorítás nélküli kihúzóvizsgálatok során a ragasztott rögzítések tönkremeneteleként minden esetben a beton kúpszerű tönkremenetelét tapasztaltam (5.9. ábra). A hőterhelt betonok esetén a kilenc mérésből két esetben a betonkúp a vizsgálat végeztével széteset, ezért itt nem volt

lehetőség a kúp geometriájának lemérésére. A többi vizsgálathoz tartozó kúp hajlásszögének megméréséből megállapítottam, hogy mind a három hőterhelés esetén a kúp hajlásszöge  $31^\circ$ - $40^\circ$  közé eset (átlag:  $34,2^\circ$ , szórás:  $3,4^\circ$ ).

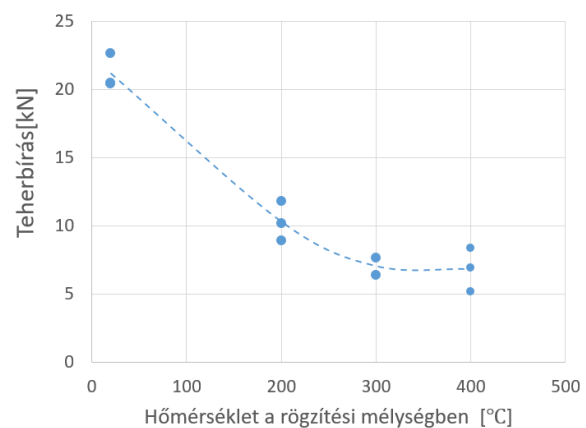


5.9. ábra: Kúpszerű kiszakadás tűzkárosodott betonban

A referencia próbatesteken mért leszorítás nélküli kihúzóvizsgálatok erő – elmozdulás görbéje rideg tönkremenetelt írt le (5.10. ábra), a kezdeti gyors erőfelvételt, a maximális teherbírás elérése után egy gyors tönkremenetel követte, amihez kis elmozdulások tartoztak. A tűzterhelt próbatesteken mért kihúzóvizsgálatok erő – elmozdulás görbéin látható a fokozatos teherbíráscsökkenés. Megfigyelhető, hogy a görbék a hőmérséklet emelkedésével egyre jobban ellaposodtak, ami azt jelenti, hogy a tönkremenetelhez egyre nagyobb elmozdulások tartoztak. Az 5.11. ábra a rögzítések teherbírását, mutatja a hőmérséklet függvényében. Az eredmények alapján elmondható, hogy a teherbírás a hőmérséklet emelkedésével csökkent.



5.10. ábra: A tönkremenetekhez tartozó tipikus erő-elmozdulás görbék (a hőmérsékleti érték a rögzítési mélységre vonatkozik)

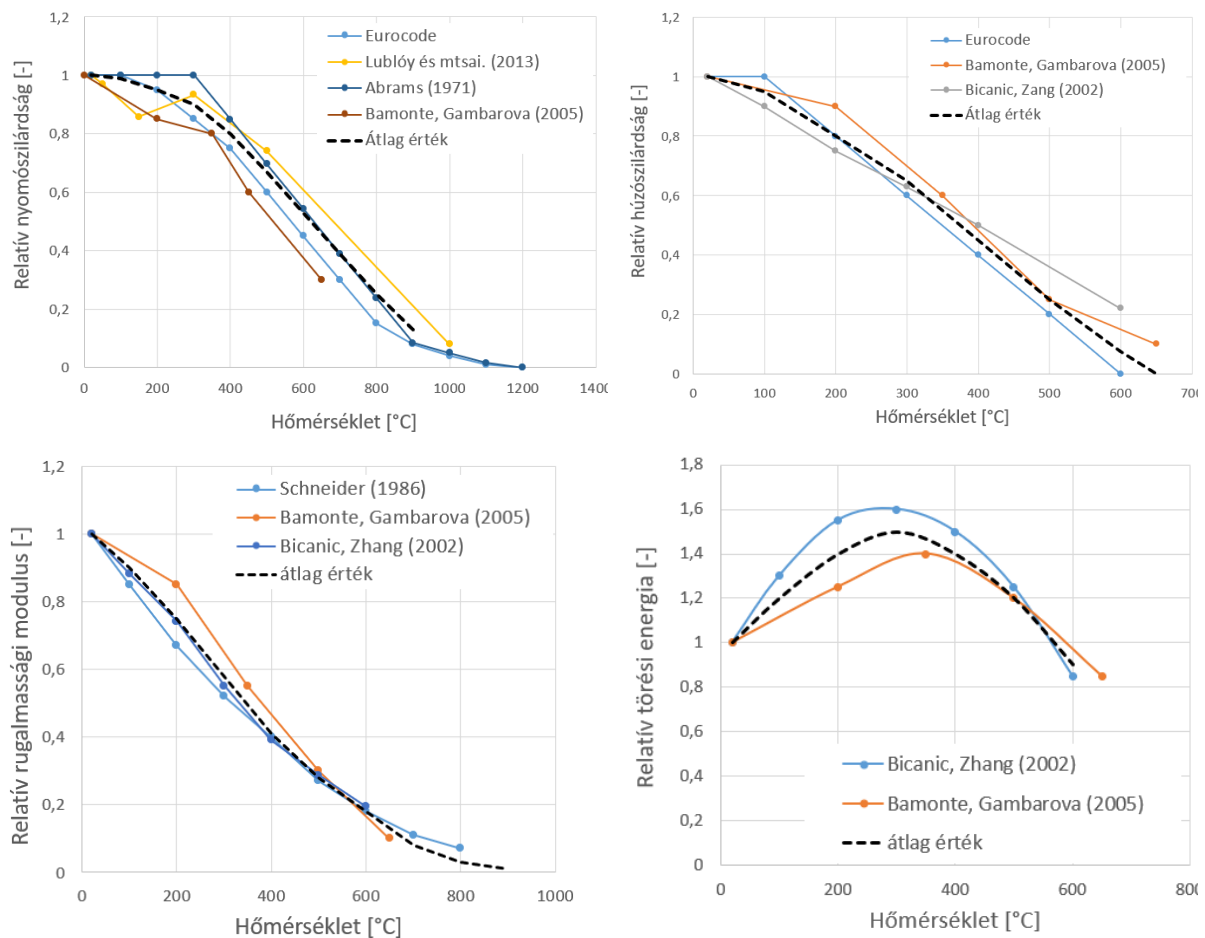


5.11. ábra: Rögzítések mért egyedi teherbírása a rögzítési mélység hőmérsékletének függvényében (egyes pontok fedésben vannak)

#### 5.4 Teherbírás meghatározása

A laboratóriumi eredmények számításal való reprodukálásához az irodalomban fellelhető a rögzítőelemek kúpszerű tönkremenetelét leíró képleteket alkalmaztam (lásd: 2.2 fejezet). Mivel ezek a képletek önmagukban nem képesek kezelni a betonban rétegesen eltérő szilárdsági értékeket ezért a képletek módosítására volt szükség. A számítás során a beton mélység mentén

változó szilárdsági paramétereinek meghatározásához szakirodalomban található összefüggéseket használtam [36], [41], [44]–[47] (5.12. ábra) a hőtechnikai modellből kapott hőmérséklet eloszlás felhasználásával.



5.12. ábra: Beton relatív szilárdsági paramétereinek a hőmérséklet függvényében

Számításaimban a teljes kúpot rétegenként vizsgáltam, minden egyes rétegben meghatároztam az átlagos szilárdsági paramétert, majd ezeket az egyes rétegekben található szakadókúp palást felületek arányában súlyozottan átlagoltam:

$$f_{c,200}^* = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \frac{A_i}{A}, \quad (5.1)$$

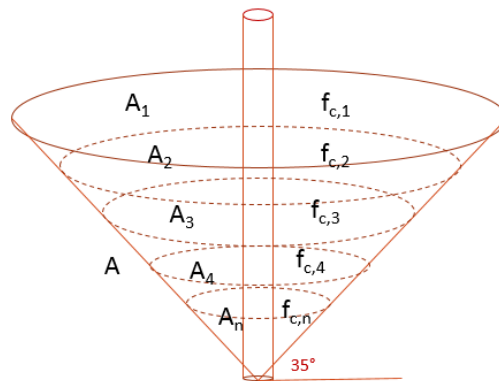
ahol:

- $f_i$  a kúppalást egy zónájához tartozó szilárdsági érték (két szélsőérték átlaga),
- $A_i$  egy kúppalást rész felülete,
- $A$  a teljes kúppalást felülete.

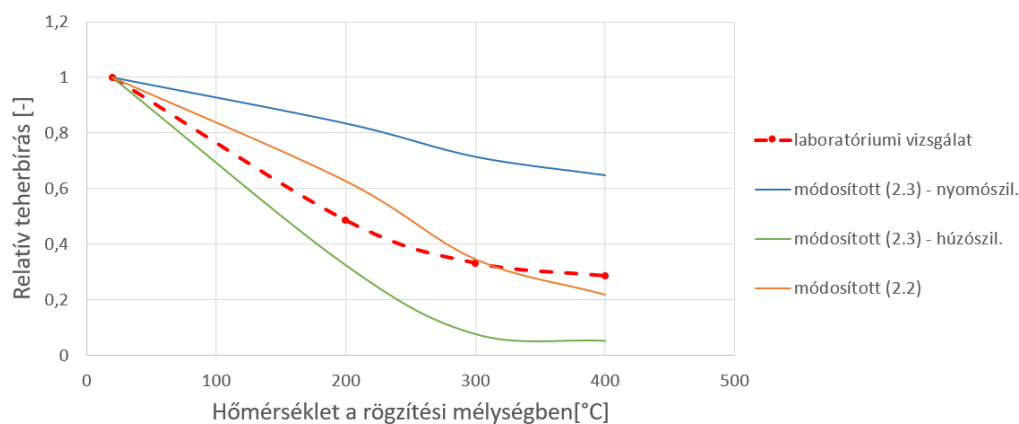
Az 5.13. ábra az (5.1) képlet összetevőit ábrázolja.

A leírt módszerrel figyelembe tudtam venni a beton rétegenként eltérő szilárdságát, aminek segítségével módosítottam a rögzítések kúpszerű kiszakadását leíró (2.2) és (2.3) összefüggést. A (2.3) képlet esetén mivel az összefüggés tartalmazza az  $\sqrt{f_c} \approx f_{ct}$  feltételezést, így mind a nyomószilárdság, mind a húzószilárdság behelyettesíthető. Számításaim során mind a két

változatot felhasználtam. A számítások eredményeit a 5.14. ábra foglalja össze, az eredményeket a 2.3 Tézis elemzi.



5.13. ábra: A beton kúpszerű kiszakadáshoz tartozó teherbírás módosított szilárdságértékeinek meghatározása



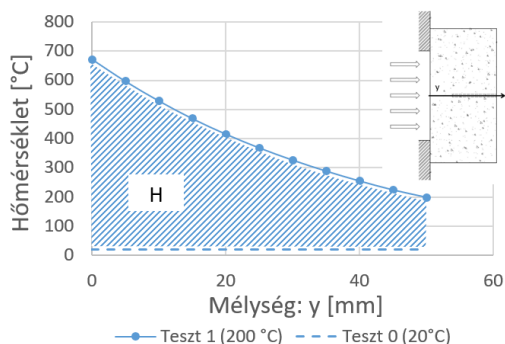
5.14. ábra: Relatív maradó teherbírás a rögzítési mélység hőmérsékletének függvényében, laboratóriumi és számítási eredmények

### 5.5 Inverz módszerrel meghatározott csökkentő tényezős eljárás

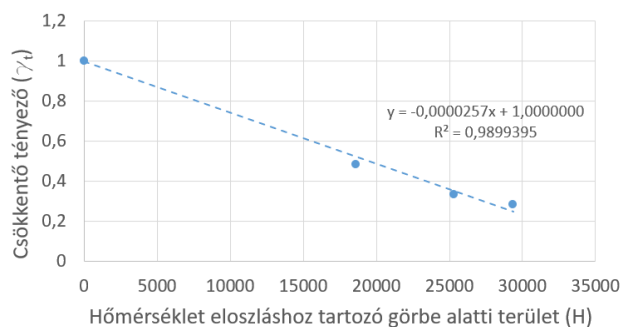
A méretezést segítve a laboratóriumi eredményekből visszszámolva felírható egy egyszerűsített képlet a csökkentett teherbírás meghatározására.

Mivel a  $\gamma_t$  csökkentő tényező (a tűzterhelt betonban és a tűzterhelés nélküli betonban mért átlag teherbírás aránya) a beton károsodásából adódik, ezért jól jellemezhető azzal a bevitt többlethőmérséklettel, ami a beton tönkremenetelét okozza. Az 5.15. ábra a Teszt 1 kísérlethez tartozó hőmérséklet eloszlást és az abból kapott görbe alatti területet (H) mutatja. Az így kapott terület (H) jellemzi azt a többlet hőmérsékletet, amit a hőterhelés során kapott a beton próbatest. A görbe alatti terület és a laboratóriumi kísérletekből visszszámolt csökkentő tényező összefüggésének ábrázolásából látható, hogy a két érték lineárisan függ egymástól (5.16. ábra). A kidolgozott csökkentő tényezős módszert kiterjesztettem az irodalomban megtalálható, kísérleti eredményekre is. A kísérletek leírása a teherbírási adatok mellett tartalmazta az alkalmazott hőterhelést és a felhasznált beton keverékek testsűrűségét [36], így numerikus szimuláció segítségével a próbatestekben kialakuló izotermák eloszlása számítható volt. A kapott összefüggéseket az 5.17. ábra szemlélteti. Az illesztett egyenesek meredekségét (a) és

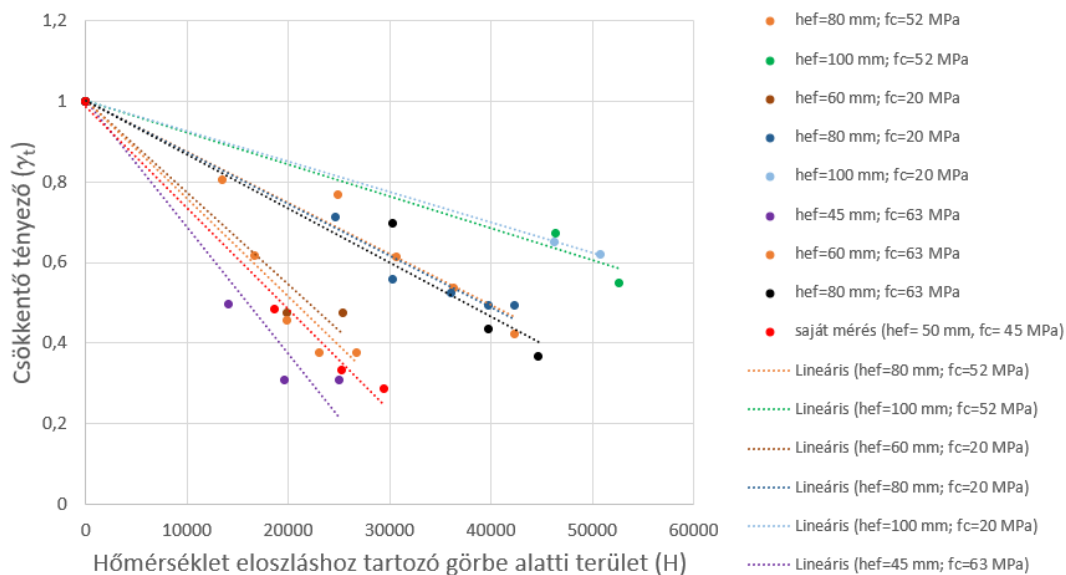
az illesztéshez tartozó szórás négyzetét ( $R^2$ ) a jobb áttekinthetőség végett a 5.4. táblázat foglalja össze.



5.15. ábra: Teszt 1-hez tartozó hőmérséklet eloszlás és a kapott görbe alatti területe (H)



5.16. ábra: A csökkentő tényező alakulása a hőmérséklet eloszláshoz tartozó görbe alatti terület függvényében

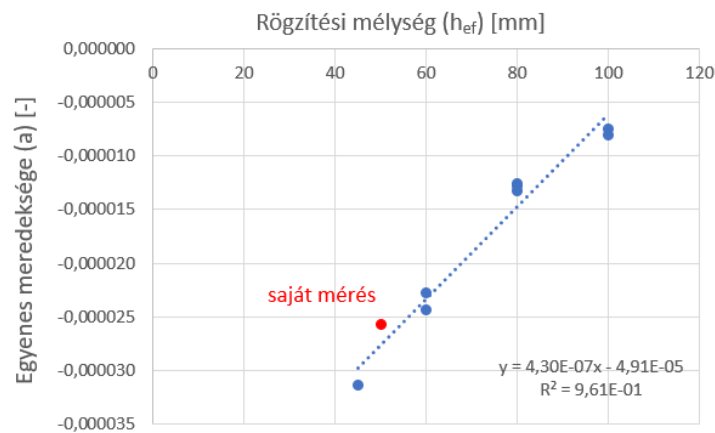


5.17. ábra: A csökkentő tényező alakulása a hőmérséklet eloszláshoz tartozó görbe alatti terület függvényében saját és az irodalomban található mérések alapján

5.4. táblázat: Az irodalmi adatokra illesztett egyenesek meredeksége és az illesztéshez tartozó szórásnégyzet

Nyomószilárdság [N/mm <sup>2</sup> ]	Rögzítési mélység ( $h_{ef}$ ) [mm]	Illesztett egyenes meredeksége (a) [-]	Illesztés szórás négyzete ( $R^2$ ) [-]
52	80	-0,0000126	0,96
52	100	-0,0000081	0,96
20	60	-0,0000228	0,96
20	80	-0,0000128	0,97
20	100	-0,0000075	1,0
63	45	-0,0000314	0,94
63	60	-0,0000243	0,92
63	80	-0,0000133	0,95

Az eredményekből látható, hogy a különböző rögzítési mélységekhez eltérő meredekségű egyenesek tartoznak (5.17. ábra), az egyenesek meredeksége lineárisan függ a rögzítési mélység nagyságától (5.18. ábra).



5.18. ábra: Az illesztett egyenesek meredeksége és a rögzítési mélység közti összefüggés

Az így kapott két lineáris összefüggés alapján felírható egy csökkentő szorzótényező, ami a hőterhelés mértékéből és a rögzítési mélységből számítható (ld. 2.4. Tézis).

## 2. Téziscsoport: Ragasztott rögzítések viselkedése hőkárosodott betonban húzó igénybevétel esetén [HV3], [HV4], [HV5], [HV6], [HV7], [HV10], [HV11], [HV12]

### 2.1. Tézis

Kísérletileg igazoltam, hogy ki tud alakulni megfelelő tapadószilárdság a vizsgált ragasztók (epoxi, vinilészter-hibrid) és a hőkárosodott beton között. Ezért ezen ragasztók alkalmasak rögzítések kialakítására tűzkárosodott betonban.

### 2.2. Tézis

A szemrevételezés és a beton szakadókúpok geometriájának lemeréséből kísérletileg igazoltam, hogy hőterhelés esetén a szakadókúp hajlásszöge  $31^\circ$ - $40^\circ$  közé esik. Ez alapján hőterhelt beton esetén a kialakuló szakadókúp hajlásszöge megegyezik a hőterhelés nélküli betonoknál is feltételezett  $35^\circ$ -kal.

### 2.3. Tézis

A leszorítás nélküli kihúzóvizsgálat laboratóriumi eredményeinek számítás útján való reprodukálásához az irodalomban fellelhető a rögzítőelemek szakadókúpszerű tönkremenetelét leíró képleteket alkalmaztam [11], [13]. Ezek a képletek önmagukban nem képesek kezelni a betonban rétegesen eltérő szilárdsági eltéréseket ezért a képletek módosítására volt szükség.

Saját kísérleti eredmények, továbbá a beton kúpszerű tönkremenetelét leíró képletek és az izotermákból adódó szilárdsági értékek rétegenkénti, kúpfelület részekkel arányos módosításából adódó eredmények alapján számítás útján megállapítottam, hogy:

- a beton nyomószilárdságát használó formula eredményei jellegében megközelítik a mért adatokra illesztett görbét, azonban értékeiben jelentősen fölé becsüli a mért eredményeket, ezért a teherbírás meghatározására nem használható,
- a beton rugalmassági modulusát és törési energiáját használó formula jellegében jelentősen eltér a mért adatokra illesztett görbétől, ezért a teherbírás meghatározására nem javasolt,
- a beton húzószilárdságát használó formula eredményei jellegében megközelítik a mért adatokra illesztett görbét, értékeiben alábecsüli a mért eredményeket, ezért a biztonság javára ez a formula használható leginkább a teherbírás meghatározására.

## 2.4. Tézis

A méretezést segítve a laboratóriumi eredmények alapján felírható egy egyszerűsített, csökkentő tényezős képlet a teherbírás meghatározására. Mivel a  $\gamma_t$  csökkentő tényező a beton károsodásából adódik, ezért jól jellemezhető azzal a bevitt többlet hőmérséklettel, ami a beton tönkremenetelét okozza, továbbá hatással van rá a rögzítési mélység is. Saját és az irodalomban fellelhető kísérleti eredmények [36] felhasználásával (összesen 72 db mérési eredmény) a csökkentő tényező a következő empirikus összefüggéssel írható le:

$$\frac{N_{u,c,t}^0}{N_{u,c}^0} = \gamma_t = 1 - (491 - 4,3 \cdot h_{ef}) \cdot 10^{-7} \cdot H, \quad (5.2)$$

ahol:

- $N_{u,c,t}^0$  a beton zavartalan kúpszerű kiszakadásához tartozó teherbírasi határérték hőterhelt betonban [N],
- $N_{u,c}^0$  a beton zavartalan kúpszerű kiszakadásához tartozó teherbírasi határérték normál hőmérsékleten [N],
- $\gamma_t$  csökkentő tényező [-],
- $h_{ef}$  rögzítési mélység (mm-ben behelyettesítve),
- $H$  a hőmérséklet mélység menti eloszlásából kapott görbe alatti terület (mm $\cdot$ °C-ban behelyettesítve).

**Saját és irodalmi mérési adatok alapján kidolgoztam egy módszert egy csökkentő (szorzó)tényező megállapítására, amely segítségével a hőterhelés nélküli beton kúpszerű kiszakadásához tartozó teherbírásából számítható ugyanezen érték hőkárosodott betonban. A csökkentő tényező a hőterhelés mértékéből és a rögzítési mélységből számítható.** A módszer előnye, hogy bármilyen jellegű tűz esetén normál hőmérsékleten vett teherbírás és a betonban kialakult izoterma vonalak ismeretében a képlet felhasználásával a hőkárosodott betonban elhelyezett rögzítőelem teherbírása egyszerűen számítható. A módszer hátránya, hogy csak olyan esetben alkalmazható, ha a rögzítési mélység teljes hossza a beton hőkárosodott rétegében helyezkedik el, mivel az így számolt csökkentő tényező nem veszi figyelembe az épen maradt rétegek teherbírását.

## 6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Doktori kutatásommal elősegítettem a szálerősítésű betonokban és a tűzkárosodott betonokban elhelyezett rögzítésekkel kapcsolatok ismeretek bővülését.

Értekezésem rávilágított arra, hogy szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítések esetén azonos acélszál adagolás mellett a rövidebb és vékonyabb szálak jelentősen nagyobb hatással vannak a teherbírás meghatározására, mint a hosszabb és vastagabb szálak. Ennek a hatásnak a figyelembevétele meghatározó a rögzítések teherbírásának tervezésénél. További eredményeim kimutatták, hogy a műanyag szál vizsgált adagolása esetén ugyanazok a teherbírási képletek használhatók az 50 mm rögzítési mélységben elhelyezett rögzítések teherbírására, mint a hagyományos betonokban elhelyezett rögzítésekénél, mivel az 50 mm hosszú makro-szálaknak nincs hatása a teherbírásra  $3,0-6,0 \text{ kg/m}^3$  száladagolás és 50 mm rögzítési mélység mellett.

Kutatásom igazolta, hogy létre tud jönni a kívánt tapadás a tűzkárosodott beton és a vizsgált ragasztók (epoxi, vinilészter-hibrid) között, így ezek a rögzítések alkalmasak a tűzkárosodott betonban való használatra. Értekezésem felhívja a figyelmet arra, hogy a hagyományos CC-Method által javasolt formula nem alkalmas a tűzkárosodott 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 tényezős eljárás, aminek segítségével a hőterhelés jellegéből és a rögzítési mélységből meghatározható a rögzítés teherbírása.

A doktori értekezésemben összegyűjtött irodalmi háttér és bemutatott kísérleti eredmények felhasználhatók az egyetemi oktatásban.

## 7. KITEKINTÉS

Doktori kutatásomban előbb szálerősítésű betonokban majd tűzkárosodott betonban elhelyezett rögzítések viselkedését elemeztem. Mind a két téma további kutatási lehetőségeket hordoz magában, amikkel a jövőben érdemes foglalkozni.

Szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítések esetében a jelenlegi kutatásban alkalmazott acélszálak és száladagolások mellett a nagyobb rögzítési mélységek vizsgálata lenne célszerű. Nagyobb rögzítési mélységek vizsgálatával felírhatóvá válna egy szálhossz – száltartalom – rögzítési mélység összefüggés, ami meghatározó lehet a szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítőelemek teherbírásának számításánál. A szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítések méretezési módszerének kidolgozásához szükséges az eredmények numerikus szimulációval való alátámasztása is. A szálerősítésű betonokban elhelyezett rögzítések esetében a megfelelő végeelemes szoftver kiválasztása mellett további kérdéseket vet fel a szálerősítés hatásának megfelelő figyelembevétele. Numerikus szimulációknál bevett eljárás amikor a szálerősítés hatását a beton törési energiájának módosításával veszik figyelembe [48], [49]. Ez az eljárás viszont nem tudja kezelni a szálorientációból adódó hatásokat, a száleloszlást azonosnak tekinti



az egész keresztmetszetben. Numerikus szimulációk során a szálak elhelyezkedésének hatását akkor lehet figyelembe venni, ha a szálak is modellezésre kerülnek a szimulációban [50]. Ilyenkor a szálak kiosztása lehet véletlenszerű, vagy pontos száeloszlást is alkalmazhatunk CT (Computed Tomography) felvételek alapján.

A tűzkárosodott betonban elhelyezett rögzítőelemek teherbírására megalkotott csökkentő tényezőes képlet numerikus szimulációval való alátámasztása szintén egy jövőbe mutató kutatási irány. A hőterhelt betonok végeeselemes vizsgálatának problémája a visszahűlt állapot értelmezése, mivel ebben az esetben egy hőmérséklethez két anyagi jellemző is tartozik, ami értelmezhetetlen a numerikus analízisek szempontjából.

## 8. ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

- [HV1] **Hlavička V.**, Lublósy É. (2016): „Epoxyval ragasztott rögzítőelemek viselkedése szálerősítésű betonban”, XX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2016, Csíksomlyó, Románia, pp. 97-110.
- [HV2] **Hlavička V.**, Lublósy É. (2016): „Effect of fibre reinforcement on the behaviour of post-installed anchors” Proceedings of 11th fib International PHD Symposium in Civil Engineering, Tokió, Japán, pp. 311-318.
- [HV3] **Hlavička V.**, Lublósy É. (2017): „Load bearing capacity of bonded anchors in thermally-damaged concrete”, Fire Protection, safety and security 2017, Zvolen, Szlovákia, pp. 70-78.
- [HV4] **Hlavička V.**, Lublósy É., Balázs L. Gy. (2017): „Experimental study on the behavior of bonded anchors in thermally damaged concrete”, 3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete, Stuttgart, Németország, pp. 335-346.
- [HV5] **Hlavička V.**, Lublósy É. (2017): „Bonded anchors in thermally-damaged concrete”, Innovative materials and technologies for concrete structures: Tokaj 2017 The 12th Central European Congress on Concrete Engineering. CCC2017 Proceedings, Budapest, Magyarország, pp. 246-253.
- [HV6] **Hlavička V.**, Lublósy É., Takács L. (2017): „Load bearing capacity of anchors in thermally damaged reinforced concrete”, IFireSS 2017 2nd International Fire Safety Symposium, Naples, pp. 349-356.
- [HV7] **Hlavička V.**, Lublósy É. (2018): „Concrete cone failure of bonded anchors in thermally damaged concrete”, CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS 171, pp. 588-597.
- [HV8] **Hlavička V.**, Lublósy É. (2018): „Experimental study on the behaviour of bonded anchoring systems in fibre reinforcement concrete”, CONCRETE STRUCTURES, Journal of the hungarian group of *fib* 19: 1, pp. 28-34.
- [HV9] **Hlavička V.**, Lublósy É. (2018): „Experimental and numerical study of the behaviour of post installed anchors in FRC”, Proceedings of the 12th International PhD Symposium in Civil Engineering, Prága, Csehország, pp. 71-78.

- [HV10] **Hlavička V.**, Lublőy É. (2018): „Rögzítőelemek kúpos kiszakadása tűzkárosodott betonban”, *VÉDELEM TUDOMÁNY: KATASZTRÓFAVÉDELMI ONLINE TUDOMÁNYOS FOLYÓIRAT III*: 4, pp. 1-25.
- [HV11] **Hlavička V.**, Lublőy É. (2019): „Bond strength of bonded anchors in thermally-damaged concrete”, 3rd International Fire Safety Symposium, Ottawa, Ontario, Canada, June 5-7, pp. 179-188.
- [HV12] **Hlavička V.**, Lublőy É. (2019): „Ragasztott rögzítőelemek teherbírása hőkárosodott betonban”, XXIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2019, Csíksomlyó, Románia, pp. 40-44.

## 9. IRODALOM JEGYZÉK

- [1] EN 1992-4, „Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 4: Design of fastenings for use in concrete”, 2018.
- [2] MSZ EN 1992-4, „Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése, 4. rész: Betonban használt rögzítések tervezése”, 2019.
- [3] ETAG 001, „Guideline for european technical approval of metal anchors for use in concrete”, Brussels, 2013.
- [4] EOTA-TR 029, „Design of Bonded Anchors”, 2007.
- [5] Europäische Technische Zulassung ETA-07/0211, „fischer Ankerbolzen FBN II”, 2013.
- [6] European Technical Assessment ETA-10/0012, „fischer injection system FIS EM”, 2016.
- [7] European Technical Assessment ETA-02/0024, „Injection System fischer FIS V”, 2017.
- [8] Fujikake, K., Nakayama, J., Sato, H., Mindess, S., és Ishibashi, T., „Chemically Bonded Anchors Subjected to Rapid Pullout Loading”, *ACI Mater. J.*, köt. 100, sz. 3, o. 246–252, 2003.
- [9] Lublőy, É. és Balázs, G. L., „Behaviour of expansion and bonded anchors subjected to elevated temperature”, in *2nd International Symposium on Connections between Steel and Concrete*, 2007, o. 329–338.
- [10] fib MC, *MODEL CODE 2010*. Berlin, Germany: Ernst&Sohn, 2013.
- [11] Eligehausen, R. és Sawage, W., „A fracture mechanics based description of the pullout behaviour of headed studs embedded in concrete”, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures, From Theory to Applications*, 1989, o. 281–299.
- [12] Fuchs, W. és Eligehausen, R., „Das CC-Verfahren für die Berechnung der Betonausbruchlast von Verankerungen (CC-method for determination of the concrete failure load of fastenings)”, *Beton- und Stahlbetonbau*, sz. 1, o. 6–9, 1995.
- [13] Fuchs, W., Eligehausen, R., és Breen, J. E., „Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete”, *ACI Struct. J.*, köt. 92, sz. 1, o. 73–94, 1995.
- [14] Fuchs, W., Eligehausen, R., és Breen, J. E., „Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, Authors' Closure to Discussions”, *ACI Struct. J.*, köt. 92, sz. 6, o. 794–802, 1995.
- [15] Eligehausen, R. és Ožbolt, J., „Size Effect in Design of Fastenings, Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures”, in *HERMES Science Publications*, HERMES., G. Pijaudier-Cabot, Z. Bittnar, és B. Gérard, Szerk. Paris, 1999, o. 95–118.
- [16] ACI Committee 318, „Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)”, 2014.
- [17] Bažant, Z. P., „Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal”, *J. Eng. Mech.*, 1984.
- [18] ACI Committee 349, „Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-85)”, 1985.
- [19] CEB, *Fastenings to Concrete and Masonry Structures: State-of-the-art report*. London, UK: Comité Euro-International du Béton (CEB), 1994.
- [20] ACI Committee 355, *Guide for Design of Anchorage to Concrete: Examples Using ACI 318 Appendix D*. 2011.

- [21] MSZ EN 12390-3, „A megszilárdult beton vizsgálata – A próbatestek nyomószilárdsága”, 2009.
- [22] Kausay, T., *BETON - A BETONSZABVÁNY NÉHÁNY FEJEZETÉNEK ÉRTELMEZÉSE*. Budapest, Hungary: Mérnöki Kamara Nonprofit Kft., 2013.
- [23] MSZ EN 12390-5, „A megszilárdult beton vizsgálata - A próbatestek hajlító-húzószilárdság vizsgálata”, 2009.
- [24] MSZ EN 12390-6, „A megszilárdult beton vizsgálata - A próbatestek hasító-húzó szilárdsága”, 2010.
- [25] MSZ EN 1936, „Természetes építőkövek vizsgálati módszerei. Az anyagsűrűség és a testsűrűség, valamint a teljes és a nyílt porozitás meghatározása”, 2007.
- [26] Cook, R. A., Kunz, J., Fuchs, W., és Konz, R. C., „Behaviour and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete”, *ACI Struct. J.*, köt. 95, sz. 1, o. 9–26, 1998.
- [27] Walter, E. és Ammann, W. J., „Fastening technology in fibre reinforced concrete”, in *Fibre Reinforced Cement and Concrete Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium*, 1992, o. 659–675.
- [28] Klug, Y., Holschemacher, K., Yvette Klug, D.-I., Klaus Holschemacher, D.-I., Leipzig, H., és Wittmann, F., „Tragverhalten von Befestigungselementen in Stahlfaserbeton Steel fibre reinforced concrete View project Confinement of RC columns with CFRP View project Tragverhalten von Befestigungselementen in Stahlfaserbeton”, 2016.
- [29] Nilforoush, R., Nilsson, M., és Elfgrén, L., „Experimental evaluation of tensile behaviour of single cast-in-place anchor bolts in plain and steel fibre-reinforced normal- and high-strength concrete”, *Eng. Struct.*, köt. 147, o. 195–206, 2017.
- [30] Tóth, M., Bokor, B., és Sharma, A., „Anchorage in steel fiber reinforced concrete – concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes”, *Eng. Struct.*, köt. 181, o. 60–75, febr. 2019.
- [31] Coventry, K., Richardson, A., Mc Intyre, C., és Aresh, B., „Pullout Performance of Chemical Anchor Bolts in Fibre Concrete”, in *FIBRE CONCRETE 2011*, 2011, o. 1–11.
- [32] Ožbolt, J., Bošnjak, J., Periški, G., és Sharma, A., „3D numerical analysis of reinforced concrete beams exposed to elevated temperature”, *Eng. Struct.*, köt. 58, o. 166–174, 2014.
- [33] Lakhani, H. és Hofmann, J., „A Numerical Method to Evaluate the Pull-Out Strength of Bonded Anchors Under Fire”, in *3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete*, 2017, o. 1079–1090.
- [34] EAD 330087-00-0601, „Systems for post-installed rebar connections with mortar”, 2015.
- [35] Reichert, M. és Thiele, C., „Qualification of Bonded Anchors in Case of Fire”, in *3rd International Symposium on Connections between Steel and Concrete*, 2017, o. 1091–1099.
- [36] Bamonte, P., Gambarova, P. G., Bruni, M., és Rossini, L., „Ultimate capacity of undercut fasteners installed in thermally-damaged High-Performance Concrete”, in *6th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete Structures – FraMCoS-6*, 2007, o. 18–21.
- [37] CEB-FIP, *MODEL CODE 1990*. Thomas Telford Publishing, 1993.
- [38] EN 1992-1-1, „Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”, 2004.
- [39] ISO 834-1, „Fire-resistance Tests – Elements of building construction, Part 1: General requirements”, 1999.
- [40] Ansys Inc., „Ansys Mechanical”. 2015.
- [41] EN 1992-1-2, „Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design”, 2004.
- [42] fib BULLETIN 38, *Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling*. Sprint-Digital-Druck, 2007.
- [43] fib BULLETIN 46, *Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment*. 2008.
- [44] Abrams, M. S., „Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F”, in *ACI SP 25, Temperature and Concrete*, 1971.
- [45] Lublój, É., Balázs, G. L., és Czoboly, O., „Influence of particular components of concrete composition to residual compressive strength after temperature loading”, in *The 9th Central European Congress on Concrete Engineering*, 2013, o. 4–6.
- [46] Bicanic, N. és Zhang, B., „Residual Fracture Toughness of Normal- and High-Strength Gravel

- Concrete after Heating to 600 °C”, *ACI Mater. J.*, köt. 99, sz. 3, o. 217–226, 2002.
- [47] Schneider, U., *Properties of Materials High Temperature, Concrete*, 2nd Editio. Kassel: RILEM Technical Comitee 44-PHT, Technical University of Kassel, 1986.
- [48] Juhász, K. P., „FRACTURE ENERGY METHOD FOR FIBRE REINFORCED CONCRETE”, in *FIBRE CONCRETE 2013*, 2013.
- [49] Sajdlová, T., Pukl, R., Juhász, K. P., Nagy, L., és Schaul, P., „Fibre reinforced concrete constitutive laws for numerical simulation.”, in *Proceedings of Central European Concrete Conference 2017, Innovative materials and technologies for concrete structures*, 2017, o. 632–639.
- [50] Soetens, T. és Matthys, S., „Different methods to model the post-cracking behaviour of hooked-end steel fibre reinforced concrete”, *Constr. Build. Mater.*, köt. 73, o. 458–471, 2014.