

VASBETONÉPÍTÉS

CONCRETE STRUCTURES

JOURNAL OF THE HUNGARIAN GROUP OF *fib*



SZÉL STEFÁNIA MÁRIA –
SZINVAI SZABOLCS

**GFRP BETÉTEK
MECHANIKAI ÉS TAPADÁSI
VISELKEDESÉNEK
NUMERIKUS VIZSGÁLATA
HŐMÉRSÉKLETI TERHELÉS
HATÁSÁRA**

70

DR. HLAVICKA VIKTOR –
DR. MAJOROSNÉ DR. LUBLÓY ÉVA
ESZTER

**ZÚZOTT BETON TÉRKŐ,
MINT ÚJRAHASZNOSÍTOTT
ADALÉKANYAG HATÁSA
A BETON SZILÁRDSÁGÁRA
ÉS HŐÁLLÓSÁGÁRA**

78

**ACI-*fib*-RILEM
WORKSHOP CALL**

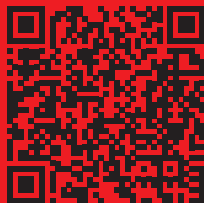
87

2025/4

XXVII. évfolyam, 4. szám

fischer 

Vasbetonszerkezetek
utólagos szénzálalás
megerősítése
C-Fiber Force



REINFORCE-FIX

REINFORCE-FIX
díjmentes tervezőszoftver
www.fischerhungary.hu

VASBETONÉPÍTÉS

műszaki folyóirat
a **fib** Magyar Tagozat lapja

CONCRETE STRUCTURES
Journal of the Hungarian Group of **fib**

Főszerkesztő:
Dr. Balázs L. György

Szerkesztők:
Hajós Bence, Dr. Koris Kálmán

Szerkesztőbizottság:

Dr. Csiki Béla
Dr. Czoboly Olivér
Dr. Erdélyi Attila
Dr. Farkas György
Dr. Hlavička Viktor
Horváth Adrián
Kolozi Gyula
Dr. Kopecskó Katalin
Dr. Kovács Károly
Dr. Kovács Imre
Dr. Kovács Tamás
Lakatos Ervin †
Dr. Lublói Éva
Mátyássy László
Dr. Móczár Balázs
Dr. Nehme G. Salem
Dr. Orbán Zoltán
Pisch Zsuzsanna
Polgár László
Dr. Sajtos István
Dr. Sólyom Sándor
Dr. Szép János
Szijártó Anna
Telekiné Királyföldi Antónia
Várdai Attila
Dr. Völgyi István

Lektori testület:

Dr. Dulácska Endre
Madaras Botond
Dr. Madaras Gábor
Dr. Tóth Ernő
(Kéziratok lektorálására más
kollégák is felkérést kaphatnak.)

Alapító: a **fib** Magyar Tagozata
Kiadó: a **fib** Magyar Tagozata
(**fib** = Nemzetközi Betonszövetség)
Szerkesztőség: BME Építőanyagok és
Magasépítés Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
Tel: 463 4068 Fax: 463 3450
E-mail: fib@eik.bme.hu
WEB <http://www.fib.bme.hu>
Az internet verzió
technikai szerkesztője:
Bíró András, doktorandusz

Tervezőszerkesztő: Halmai Csaba

Megjelenik negyedévenként
nyomtatásban (korlátozott példányszám-
ban) és online.

WEB:
<http://fib.bme.hu/kiadvanyok.html>

© a **fib** Magyar Tagozata
ISSN 1419-6441 online ISSN: 1586-0361

A hirdetések felvétele:
Tel.: 463-4068, Fax: 463-3450

Címlapfotó:
Széleromú lapátjai alig látszanak az év
végi talaj menti ködben az M1 határmenti
szakaszán
Fotó: Dr. Balázs L. György

TARTALOMJEGYZÉK

70 SZÉL STEFÁNIA MÁRIA - SZINVAI SZABOLCS
**GFRP BETÉTEK MECHANIKAI ÉS TAPADÁSI
VISELKEDÉSÉNEK NUMERIKUS VIZSGÁLATA
HŐMÉRSÉKLETI TERHELÉS HATÁSÁRA**

78 DR. HLAVICKA VIKTOR –
DR. MAJOROSNÉ DR. LUBLÓY ÉVA ESZTER
**ZÚZOTT BETON TÉRKŐ, MINT
ÚJRAHASZNOSÍTOTT ADALÉKANYAG
HATÁSA A BETON SZILÁRDSÁGÁRA ÉS
HŐÁLLÓSÁGÁRA**

87 **ACI-fib-RILEM WORKSHOP CALL**

A folyóirat támogatói:

Vasúti Hidak Alapítvány, Duna-Dráva Cement Kft., ÉMI Nonprofit Kft.,
A-Híd Zrt., MÁV Zrt., MSC Mérnöki Tervező és Tanácsadó Kft.,
Lábatlani Vasbetonipari Zrt., Pont-Terv Zrt., Swietelsky Építő Kft., Uvaterv Zrt.,
Mélyépterv Komplex Mérnöki Zrt., Hídtechnika Kft.,
Betonmix Mérnökiroda Kft., CAEC Kft., SW Umwelttechnik Magyarország Kft.,
Union Plan Kft., DCB Mérnöki Iroda Kft.,
BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,
BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

GFRP BETÉTEK MECHANIKAI ÉS TAPADÁSI VISELKEDÉSÉNEK NUMERIKUS VIZSGÁLATA HŐMÉRSÉKLETI TERHELÉS HATÁSÁRA



Szél Stefánia Mária - Szinvai Szabolcs

<https://doi.org/10.32969/VB.2025.4.1>

Hagyományos acélbetétekkel vasalt vasbeton szerkezetek élettartamát a betétek korróziója csökkenti. Ahol a tartósság kiemelten fontos, vagy a szerkezet agresszív környezetnek van kitéve, megoldás lehet a nem acél anyagú betétek alkalmazása, amik anyagösszetételükből fakadóan mentesülnek az elektrolitikus korrózió alól. Ilyen anyag az üvegszál-erősítésű polimer (GFRP). A GFRP betétek kiemelten jó tartóssági tulajdonságaik mellett könnyűek, jól vághatóak és nem mágnesezhetőek, így alkalmazásuk sokrétű lehet. Hőmérsékleti terhelésnek kitétt szerkezetek esetén azonban a mátrix (ágyazóanyag) alacsony üvegesedési hőmérséklete problémát jelenthet. A cikkben GFRP betétek mechanikai és tapadási viselkedését vizsgálták numerikus szimuláció segítségével hőterhelés hatására. Nemlineáris vége-selemes modellek készültek ATENA szoftver segítségével, ahol a mátrix és a beton térfogatelemekkel lettek definiálva, a szálak pedig beágyazott vonalelemekként jelentek meg. A megemelkedett hőmérséklet hatására a mátrix rugalmassági modulusa lecsökkent, aminek hatására a modellekben a szálak együttlétezésének hatékonysága jelentősen leromlott, így a vizsgált betét veszített merevségéből és szakítószilárdságából is. A beton és a betét közötti együttlétezés is a mátrixon keresztül valósul meg. Az eredmények azt mutatták, hogy a hőmérséklet emelésevel a beton és a betét közötti relatív elmozdulások egyre növekszenek, míg nem egy kritikus hőmérséklet esetén tapadási tönkremenetel következett be.

KULCSSZAVAK: GFRP, szakító vizsgálat, kihúzó vizsgálat, hőmérsékleti terhelés

1. BEVEZETÉS

A kompozit anyagok különböző anyagok kombinációjával jönnek létre, és kedvezőbb tulajdonságokat biztosítanak, mint az alkotóelemek külön-külön. A természetben is előfordulnak (pl. fa), és az ember is régóta használja őket (pl. sár és szalma keveréke). A GFRP mérnöki alkalmazása először a repülőgép- és hajógyártásban jelent meg, majd az autópárhuzamosan is elterjedt, főként kedvező mechanikai és kémiai tulajdonsága miatt. Az építőmérnöki alkalmazásuk az 1960-as években kezdődtek (Bank, 2006), főleg pultrúziós eljárással készült szénszálal termékekkel, amelyeket vasbeton és falazott szerkezetek megerősítésére használtak, újabban pedig acélszerkezetek esetében is vizsgálják a használhatóságukat. Mivel a vasbeton acélbetétei korrózióra hajlamosak, ez komoly fenntartási problémákat okoz, gyakran már a tervezett élettartamon belül is. A nagy karbantartási költségek, valamint az agresszív környezetnek kitétt szerkezetek miatt alternatív megoldásokat kell keresni. Erre megoldás az üvegszál-erősítésű polimer (GFRP) betétek.

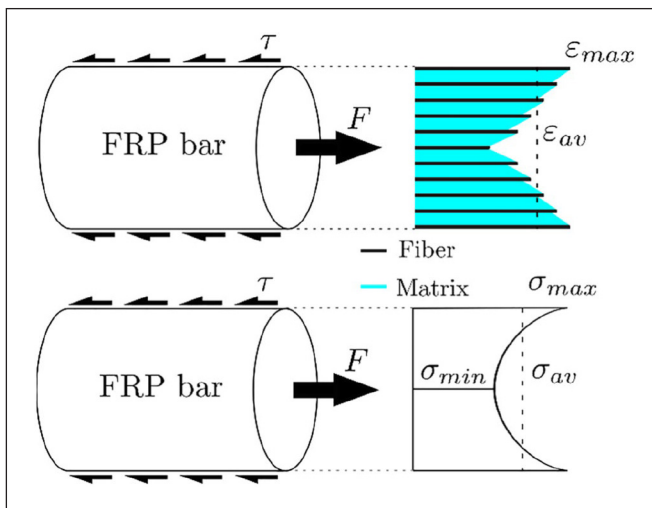
1.1 Mechanikai viselkedés

A GFRP betétek kompozit anyagok, ahol a szálak egymással párhuzamosan, tengelyirányban futnak. Ebből fakadóan viselkedésük anizotrop. A gyenge mátrixnak (ágyazóanyag) köszönhetően tengelyirányban mechanikai tulajdonságaik

kiválóak, míg tengelyirányra merőlegesen ezek a tulajdonságok egy nagyságrenddel rosszabbak. A GFRP betétek tengelyirányban jellemzően 50-60 GPa rugalmassági modulusal rendelkeznek, rövid idejű szakítószilárdságuk várható értéke pedig 1000-1500 MPa körül mozog. A szakítószilárdság értéke függ a betétek átmérőjétől is, az úgynevezett shear lag hatásnak köszönhetően.

A shear lag hatás lényege, hogy a húzóerő nem egyenletesen oszlik el az FRP rudak elemi szálai között a mátrix nyírási deformációja miatt. A kisebb merevségű mátrix nem tudja teljesen egységesen továbbítani az erőket, így a külső szálak nagyobb feszültséget vesznek fel, míg a belső szálak kevesebbet. Ennek következménye, hogy a keresztmetszeten belül nem egyenletes a feszültségeloszlás, és a nagyobb átmérőjű betétek-nél ez az egyenlőtlenség fokozódik, tehát csökken az átlagos szakítószilárdság. Ezt mutatja be az 1. ábra. A tönkremenetel során először a külső szálak szakadnak el, mivel ezek veszik fel a legnagyobb feszültséget. Emiatt a szabványok, például a kanadai CSA-S806 (CSA, 2012), korlátozzák az FRP rudak maximális keresztmetszetét (500 mm²), hogy csökkentsék a shear lag hatás negatív hatásait.

A szakítóvizsgálat az anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározására szolgáló alapvető eljárás, melyet már Leonardo da Vinci is használt. A vizsgálat során egy próbatestet húzóerővel terhelnek egészen tönkremenetelig, miközben mérik az erőt és a hozzá tartozó alakváltozást. A



1. ábra: Shear lag hatás FRP betétekben

vizsgálat pontos végrehajtása kiemelten fontos, mivel kis pontatlanságok is jelentősen torzíthatják az eredményt. Az GFRP betétek szakítóvizsgálatának sajátossága, hogy a betétet egy ágyazóanyaggal kitöltött acélső segítségével fogják be a szakítógépre. A vizsgálathoz a szabványok ajánlásokat adnak a próbatest geometriájára (lehorgonyzási hossz), a mérési körülményekre (terhelési sebesség, hőmérséklet), és a mérési eszközökre (pl. extensometer).

Az FRP próbatesteknél jellemzően a szakítószilárdság, szakadó nyúlás és rugalmassági modulus értékek a legfontosabbak. Az ASTM D7205/D7205M-06 (ASTM, 2011) és CSA S806 (CSA, 2012) szabványok különböző vizsgálati módszereket írnak elő, ami jelentős különbségeket eredményezhet a kapott eredményekben. Jelen cikk az amerikai ASTM szabvány szerint végzett vizsgálati elrendezésre épül, amelyet a kettő közül gyakrabban alkalmaznak. A szakítóvizsgálati elrendezést a 2. ábra szemlélteti.

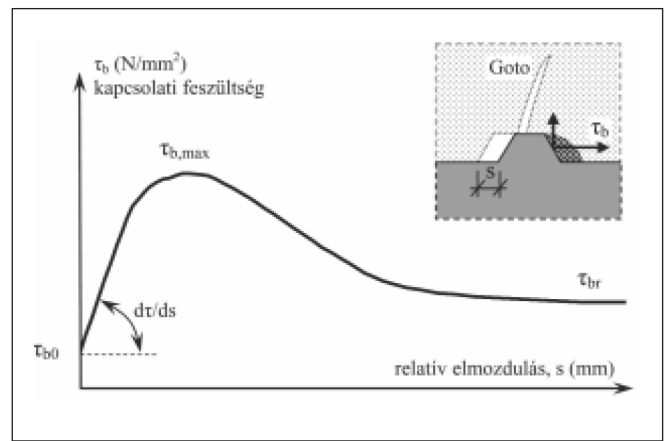
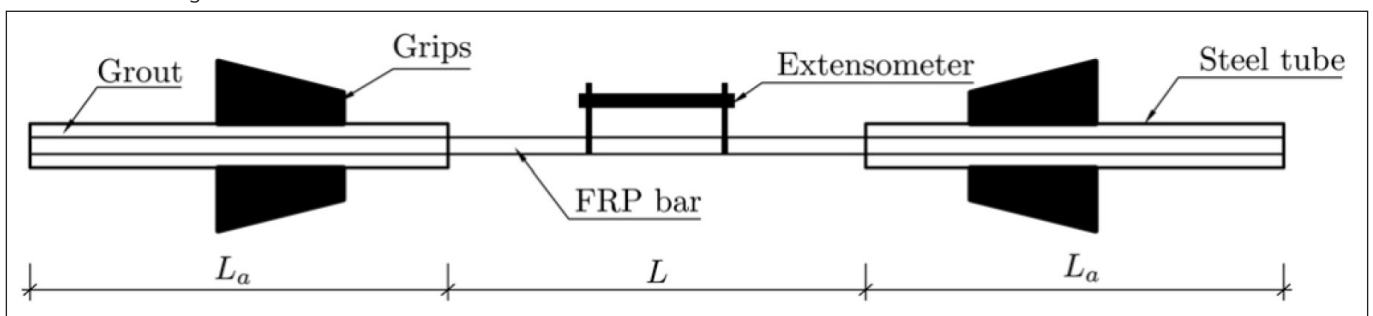
1.2 Tapadási viselkedés

Az FRP (szálerősítésű polimer) betétek tapadási viselkedése jelentősen eltér a hagyományos acélbetétektől, ami befolyásolni fogja az erőátadást, azaz a betonnal történő együttlőzést. A beton és a betétek közötti tapadás határozza meg, hogy a belső erők hogyan adódnak át az együttlőző keresztmetszetben.

A tapadási viselkedést befolyásolja többek között az anyag inhomogenitás (különösen a külső rétegekben megnövelt mátrixanyag-tartalom miatt), a felületi kialakítás (lehet homokszórt, bordázott, rovátkolt stb.) és a hőmérséklet.

Míg acélbetéteknél a kapcsolat tönkremenetele jellemzően a betonfogak elnyíródásával történik, GFRP betétek esetén a tönkremeneteli mód sokfélebb lehet, és erősen függ a felületi kialakítástól. Mivel a mátrix anyag gyengébb, így elképzelhető kihúzódás a GFRP betét felületének tönkremenetelével, például a GFRP bordázatának elnyíródásával is.

2. ábra: Szakítóvizsgálat sematikus elrendezése



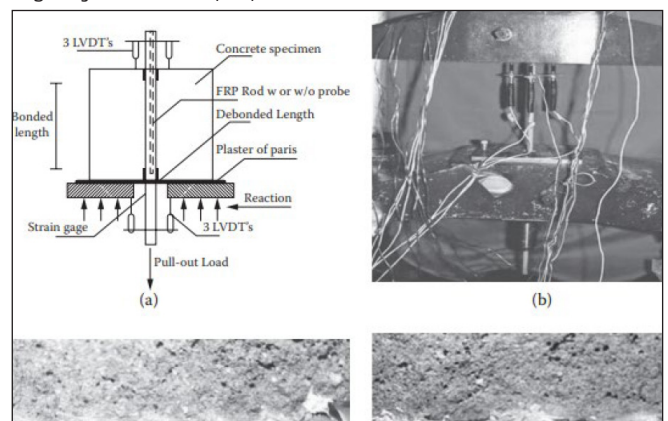
3. ábra: Tipikus tapadási feszültség-megcsúszás diagram

A tapadást két fő jellemzővel írják le: tapadási feszültség (τ), a betétben fellépő húzóerő osztva a teljes súrlódó felülettel; relatív elmozdulás (s), a beton és a betét elmozduláskülönbsége terhelés hatására. Ezeket laboratóriumi kihúzó vizsgálatokkal lehet meghatározni, az eredményeket az úgynevezett tapadási feszültség–elmozdulás (bond stress–slip) diagramokon ábrázolják (erre mutat példát a 3. ábra).

A kihúzó kísérlet (pullout test) célja a betonba ágyazott betétek (lehet betonacél, pászma vagy akár GFRP is) tapadási tulajdonságainak meghatározása. A kísérlet során a vizsgált betétet egyenletesen növekvő húzóerővel van terelve, miközben a beton próbatest valamilyen formában meg van támasztva. A mért adatok között van a terhelő erő, a terheletlen oldali megcsúszás, illetve fontos adat a terhelt oldali megcsúszás is. Így meghatározható a tapadási szilárdságot és következtetni lehet a szerkezeti viselkedésre való terhelés hatására.

A kísérlet végrehajtására különböző nemzetközi szabványok adnak ajánlást, például az amerikai ACI, a kanadai CSA, valamint az európai Eurocode. A kihúzó kísérletek elrendezése többféle lehet, többek között kocka, direkt kihúzó és gerenda. A cikk csak a kocka kihúzó kísérlettel foglalkozik (erre látható példa a 4. ábrán).

4. ábra: Kocka kihúzó vizsgálati elrendezés (a), és példa sikeresen végrehajtott kísérletre (b-d)



1.3 Termodinamikai viselkedés

A szerkezetek tervezésekor figyelembe kell venni az üzemi és rendkívüli (pl. tűz okozta) hőmérsékleti hatásokat, kifejezetten GFRP-vel vasalt vasbeton szerkezetek esetén. A megemelkedett hőmérséklet kedvezőtlenül befolyásolja a GFRP betét szakító- és tapadási tulajdonságait.

A GFRP termodinamikai jellemzői, mint például a hővezetési tényező, a fajhő és a lineáris hőtágulási együttható, jelentősen eltérnek a hagyományos acélbetétektől. Az FRP betétek hőtágulása irányfüggő: tengelyirányban (α_L) elsősorban a szálak, míg keresztirányban (α_T) inkább a mátrix anyag jellemzői érvényesülnek. Az FRP típusától függően ezek az értékek eltérőek lehetnek, például a GFRP tengelyirányú hőtágulása $\sim 6\text{--}10 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, míg a CFRP esetén akár negatív is lehet. A tipikus értékeket az 1. táblázat foglalja össze. A gyakorlatban a használati hőmérséklet-tartományban az FRP betétek hőtágulása általában nem okoz problémát. Kritikusabb tényező az alkalmazott mátrix anyag üvegesedési hőmérséklete (T_g), amely meghatározza, hogy a kompozit anyag milyen hőmérsékletig őrzi meg mechanikai tulajdonságait. A T_g értéke poliészter gyanták esetén $70\text{--}100^\circ\text{C}$, vinilészter esetén $70\text{--}160^\circ\text{C}$, míg epoxigyanta esetén $70\text{--}175^\circ\text{C}$ közé esik. Szabvány ajánlás szerint szükségszerű olyan GFRP betétet alkalmazni, amelynek mátrixa legalább 30°C -kal magasabb T_g -vel rendelkezik, mint a várható legnagyobb üzemi hőmérséklet. Rendkívüli hőhatás, például tűz esetén a mátrix lágyulása miatt romlik az erőátadás a szálak között, nő a shear lag hatás, és csökken a beton és betét közötti tapadás. Emellett, ha a betét bordázott, a hőmérsékletnövekedés a bordák merevségének csökkenéséhez, nagyobb elmozdulásokhoz és végső soron tönkremenetelhez vezethet.

1. táblázat: FRP betétek hőtágulási együtthatói

	$\alpha_{cl} \text{ [1/}^\circ\text{C]}$	$\alpha_{ct} \text{ [1/}^\circ\text{C]}$
GFRP	$6 \dots 10 \cdot 10^{-6}$	$21 \dots 23 \cdot 10^{-6}$
AFRP	$-2 \dots -6 \cdot 10^{-6}$	$60 \dots 80 \cdot 10^{-6}$
CFRP	$-9 \dots 0 \cdot 10^{-6}$	$74 \dots 104 \cdot 10^{-6}$

2. PROBLÉMA FELVETÉS

GFRP betéteket előszeretettel alkalmaznak olyan esetekben amikor a tartósság kiemelten fontos, vagy a szerkezet agresszív környezetnek van kitéve. Megemelkedett hőmérséklet ilyen alkalmazásoknál előfordulhat például tűzhatásból magasépítési szerkezeteknél, biológiai bomlásból szennyvíztisztító létesítményeknél, de vízvetékeknél is, például termásvíz vezető csövek esetén.

Magas hőmérsékleten a polimergyanták lágyulnak, azaz csökken a rugalmassági modulusuk, nő a nedvességfelvétel képességük és csökken a szilárdságuk. GFRP betétek esetén ezek közül a rugalmassági modulus csökkenése fogja jelentősen rontani a betét viselkedését. A lágyulás miatt csökken a mátrix teherátadó képessége, így a szálak között a feszültségeloszlás egyenlőtlenebb lesz. Az átlagfeszültség a betét egy keresztmetszetén belül lecsökken, azaz a szakítószilárdság is kisebb lesz. Az erőátadás a beton és a betét között is a mátrixon keresztül valósul meg, így annak lágyulása a tapadási szilárdságot is kedvezőtlenül befolyásolja.

Emiatt a GFRP kompozitokat nem szabad az üvegesedési hőmérséklet felett használni. Ez tipikusan 70°C és 200°C között változik a gyantatípustól függően. A jelenlegi útmu-

tatók ajánlása szerint üzemi állapotban a hőmérsékletnek az üvegesedési hőmérséklet alatt kell lennie legalább 30°C -kal (ACI, 2015). Így felmerül a kérdés, hogy milyen hőmérsékleti körülmények között alkalmazhatóak biztonságosan GFRP betétek, illetve hogy hogyan biztosítható a megfelelő tűzállósága a GFRP-vel vasalt betonszerkezeteknek.

A cikk célja megvizsgálni GFRP betétek viselkedését a hőmérséklet emelésének függvényében mechanikai (tengelyirányú húzás) és tapadási szempontból.

3. MEGOLDÁSI STRATÉGIA

A vizsgálat végrehajtásához nemlineáris végesesemes modellek készültek ATENA szoftver környezetben. A modell építése GiD általános preprocesszor segítségével történt. A jelenségek vizsgálatához két kísérleti elrendezés lett modellezve, egy szakítóvizsgálat és egy kihúzó vizsgálat. Mindkét esetben egy 12 mm átmérőjű Schöck Combar (Schöck, 2022) betét került modellezésre. A modellezés során először statikus terhelés történt tönkremenetelig. Ebben a lépésben történt a verifikáció (megfelelő hálóméret meghatározása) és a validáció (eredmények összehasonlítása a szakirodalmi eredményekkel).

Következő lépésben hőmérsékleti hatás lett vizsgálva. Mind a szakító, mind a kihúzó modell esetében először üzemi teher szint (használhatósági állapot) lett definiálva, majd a hőmérséklet egyenletes emelése következtében az alakváltozások monitorozása mellett következett be a tönkremenetel. A gyanta és a beton tulajdonságai hőmérsékletfüggőek voltak. A gyanta hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságai a gyártói adatokat alkalmaztuk.

4. NUMERIKUS MODELLEK

Két numerikus modell készült, egy szakító és egy kihúzó kísérleti. Mindkét esetben először statikus terhelés lett definiálva, egészen tönkremenetelig. Ez a szakító kísérleti modell esetében a szálak szakadását jelentette, a kihúzó kísérleti modell esetében pedig a kapcsolat tönkremenetelét, kihúzóadási tönkremenetelt. Ezen a modellen történt a verifikációs lépés (végesesemes háló és konvergencia ellenőrzése), valamint a validációs lépés (szakirodalmi eredmények alapján).

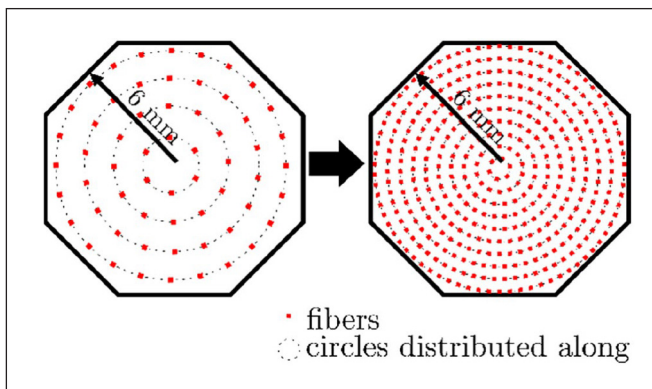
Következő lépésben üzemi teher szintű (használhatósági teherintenzitás) teher lett definiálva a modellben, majd a hőmérséklet egyenletes emelése mellett következett be a tönkremenetel, miközben a mátrix és a beton anyagmodell hőmérséklettől függött.

4.1. Geometria

A szakító kísérleti elrendezésben egy 12 mm átmérőjű betét lett modellezve, közelítően kör keresztmetszettel. A modellezett szálak koncentrikus körök mentén helyezkednek el. Egy vonalelem több szálát modellezi. Az alkalmazott vonalelemek száma a verifikációs lépésben lett meghatározva (5. ábra).

A kísérleti elrendezésben 60 cm a szabad hossza a próbatestnek, és két oldalt $40\text{--}40 \text{ cm}$ a lehorgonyzó elem hossza (6. ábra). A bal oldali lehorgonyzó elem peremfeltételként szerepel, a jobb oldali lehorgonyzó elem pedig merev testként lett definiálva.

A modellezett kihúzó kísérletnél a kocka elrendezés szerinti méretek lettek felvéve, $5d$ tapadási hosszal, azaz 60 mm -el. A betét felületének modellezésére több lehetőség van, ezeket mutatja be a 7. ábra. Teljesen hű geometria modellezése pon-



5. ábra: A modellezett szálak elrendezése a keresztmetszetben a verifikációs lépés előtt (balra) és után (jobbra) (Szinvai, 2024)

tosabb eredményt adhat, de bonyolult (Szinvai, 2022), így az ábra jobb oldalán szereplő egyszerűsített geometria szerint lettek definiálva a betét bordái. A kísérleti elrendezésnek csak a negyede szerepel a modellben a 8. ábra szerint, kihasználva a szimmetria feltételeket.

4.2. Anyagok

A mátrix térfogatelemként, lineárisan rugalmas anyagmodellel lett definiálva. A rugalmassági modulusa $E = 3 \text{ GPa}$, Poisson tényezője pedig 0,4 volt (epoxy).

Az üvegszálak lineárisan rugalmas vonalelemként lettek definiálva. Az üvegszál rugalmassági modulusa $E = 80 \text{ GPa}$ -nak lett felvéve (gyártói adat), keresztmetszeti területe pedig az adott szálkiosztás és a szál-térfogat arány függvényében változott.

A beton szintén térfogat elemként jelenik meg, C50/60-as anyagminőséggel, annak szabvány szerinti várható értékeivel, és a programban definiált "CC3DNonLinCementitious2" anyagmodellel.

A beton és a betét között súrlódó kapcsolat lett definiálva, a validációs lépés alapján 0,3-as súrlódási tényezővel.

4.3. Peremfeltételek

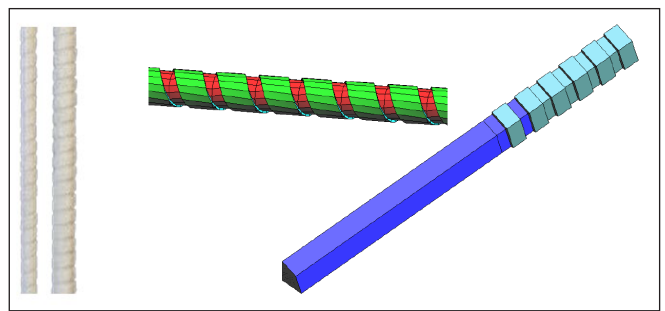
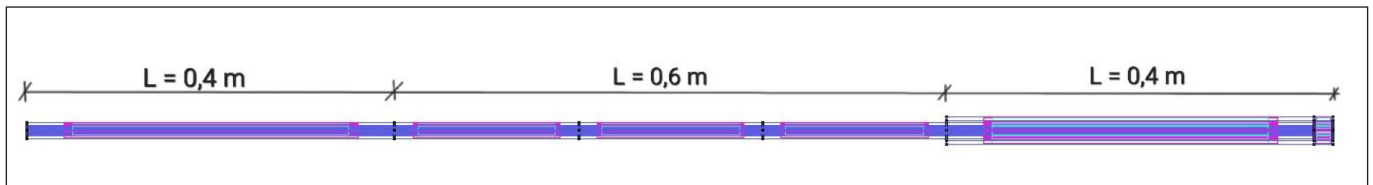
A peremfeltételeket a 9. ábra szemlélteti. A szakító kísérleti esetben a bal oldali lehorgonyzó elem mentén a külső felület tengelyirányban meg lett fogva, illetve a teljes hosszon az él mentén egy helyen keresztirányban lett definiálva megtámasztás, a modell stabilitásának eléréséhez.

A kihúzó kísérleti elrendezésnél a szimmetria feltételeknek megfelelő peremfeltételek mellett a terhelt oldalon egy teherelosztó acél lemez is megjelenik, ami a betét tengelyirányában lett megfogva.

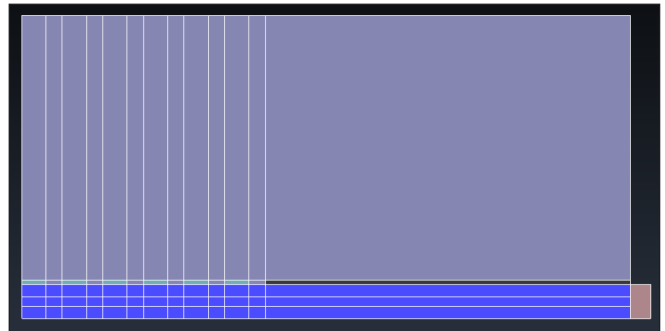
4.4. Végeselemes háló

A verifikációs lépés után alkalmazott végeselemes hálókat a 10. ábra szemlélteti. Mint látható a betét keresztmetszete mentén sűrű hálózásra volt szükség a shear lag hatás megfelelő modellezéséhez, valamint a kihúzó kísérlet estén a tapadási hossz mentén egy jelentős hálósűrítés történt.

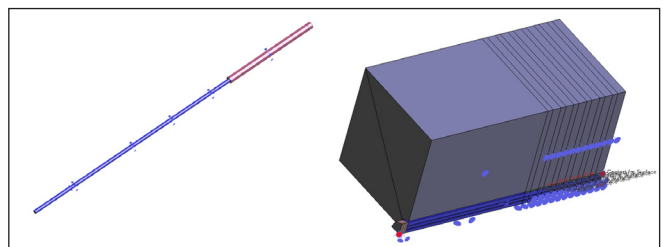
6. ábra: A szakító kísérleti elrendezés a modellben



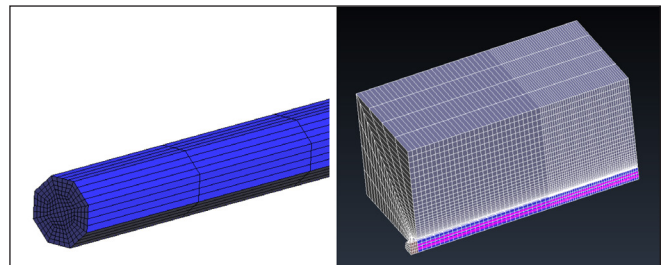
7. ábra: A valós GFRP betét, és a felületének modellezési lehetőségei



8. ábra: Modellezett kihúzó elrendezés oldalnézete



9. ábra: Peremfeltételek a szakító kísérleti elrendezésnél (balra) és a kihúzó kísérleti elrendezésnél (jobbra)

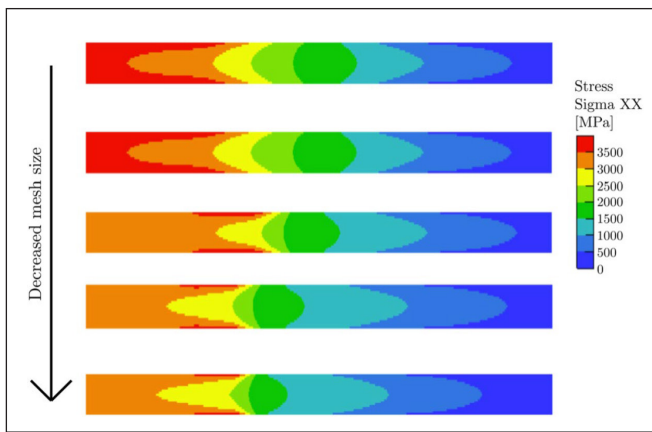


10. ábra: A modellben alkalmazott végeselemes háló a szakító kísérlet esetén (balra) és a kihúzó kísérlet esetén (jobbra)

5. EREDMÉNYEK

5.1 Szakító kísérlet

A szakirodalomban leírt ismeretek alapján a szálakban ébredő feszültségek egyre növekednek, ahogy haladunk a betét belsejétől a betét széle felé. A modellből kapott eredmények alapján a 11. ábrán látható, hogy a shear lag hatás már viszonylag nagy hálóméretnél és kis modellezett szál számnál is megjelenik, azonban a valósához közeli feszültségeloszlás csak a háló sű-



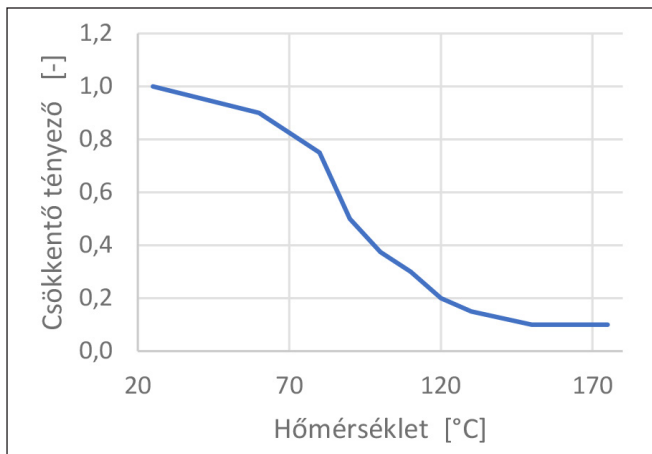
11. ábra: Szálakban ébredő húzófeszültségek [MPa] csökkenő hálóméretnél

rítése és a modellezett szálak számának növelése után alakult ki. Ezzel párhuzamosan az átlagfeszültség is egyre csökkent, azaz a szakítószilárdság is kisebb lett.

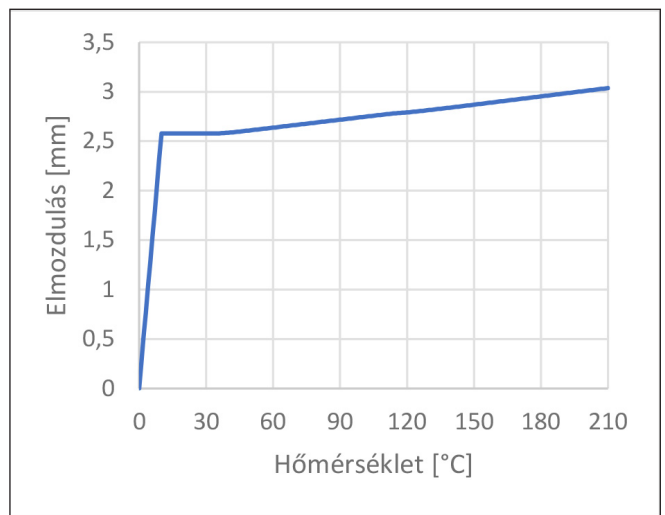
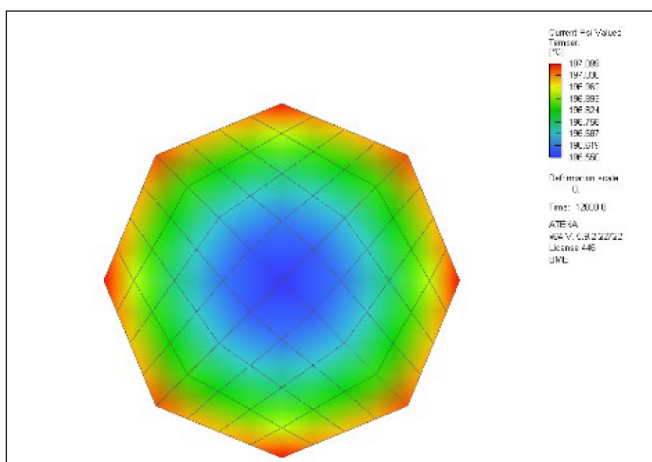
A modellnek nem célja a szakítószilárdság pontos meghatározása, hanem a rugalmassági modulus és a kompozit viselkedés (shear lag hatás) modellezése volt a cél. A statikus terhelés hatására a numerikus modellben a betét rugalmassági modulusa 60 GPa volt, ami a gyártó által megadott érték.

A statikus terhelés után a betétre üzemi teherszinten hatott hőmérsékleti hatás. Ezzel a GFRP betét alap viselkedési mechanizmusainak megértése volt a cél. A későbbiekben a modell felhasználható a GFRP betét hőmérséklettől függő szilárdságának meghatározására is. Ehhez különböző hőmérsékleti terhelés közben tönkremenetelig kell terhelni a vizsgált betétet. A

12. ábra: A mátrix rugalmassági modulusának változása a hőmérséklet függvényében



13. ábra: Hőmérséklet eloszlás keresztmetszeten belül



14. ábra: A terhelési pont elmozdulása a hőmérséklet függvényében

vizsgálati pontok pedig kirajzolják a GFRP betét viselkedését.

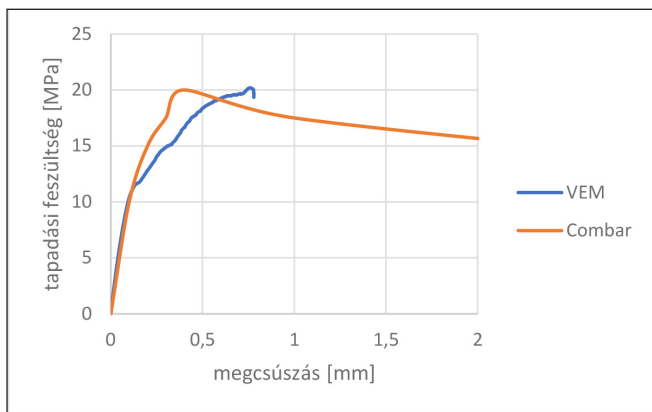
A hőmérsékleti terhelés során a mátrixnak hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságai voltak. A mátrix rugalmassági modulusának változása a hőmérséklet függvényében a 12. ábrán látható. A 13. ábrán kirajzolódik a hőmérséklet eloszlás a betéten belül a maximális terhelési hőmérséklet (170 °C) elérésekor. Mint látható, a betét belsejében még lényegesen kisebb a hőmérséklet. Ezek után a hőmérséklet további emelésével, ahol a mátrix már elérte a 170 °C-ot, további merevségcsökkenés már nincs definiálva, de a betét belsejében tovább emelkedett a hőmérséklet.

Ezzel párhuzamosan a konstans terhelő erőhöz tartozó elmozdulás is növekedett. A csökkent merevség miatt az ugyanakkora terhelő erőhöz tartozó elmozdulás megnőtt. Látható, hogy 170 °C-os terhelő hőmérséklet növelése után is még növekedett az elmozdulás, mert a betét belsejében még lényegesen kisebb volt a hőmérséklet.

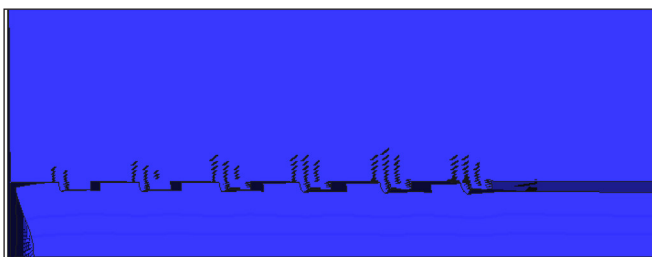
A tönkremenetel lényegében a szálak közötti feszültségeloszlás átrendeződésével következett be. Az átlagfeszültség nem változott, de a szálak között az együttdolgozás lecsökkent, a feszültségkülönbség a középső és szélső szál között egyre nagyobb lett (shear lag hatás), ami azt jelentette, hogy a szélső szálban a feszültség egyre közelebb került a szakítószilárdságához. A tönkremenetel akkor következett be, amikor a szélső kritikus szál elérte a szakítószilárdságát. Ezután a tönkremenetel hirtelen zajlott le, progresszíven. A szélső szál szakadásával az általa korábban viselt terhelés áterhelődött a körülötte lévő szálakra, és azok is túlterhelődtek, majd a teljes keresztmetszet elszakadt.

5.2 Kihúzó kísérlet

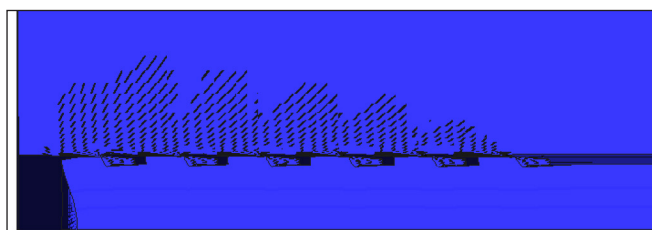
Első lépésben a kihúzó kísérleti numerikus modell tönkremenetelig lett terhelve statikus terheléssel. A validáció alapját a gyártói adatok adták. A numerikus modellből kapott tapadási feszültség-megcsúszás diagramot a gyártói adatokkal összevetve a 15. ábra mutatja be. Látható, hogy a kezdeti merevség azonos, míg ahogyan a betonfogak egyre inkább elkezdnek nyíródni, különbség alakul ki a numerikus modell és a gyártó kísérleti eredménye között. Ez nagy valószínűséggel az ATENA szoftverben alkalmazott elment repedésmodellel magyarázható, és a fix repedésiránnyal. A modellben a repedések a kialakulást követően fixált pozícióban maradtak. A repedésterjedési paraméterek módosításával (például a repedések elfordulását megengedve a beton húzási ellenállásának 20-30%-ig) az eredmény tovább lehetne javítható.



15. ábra: Tapadási feszültség-megcsúszás diagram összevetése: numerikus modell eredménye a gyártó eredményével



16. ábra: Mikrorepedések statikus terhelés hatására, a tönkremeneteli teher 20%-nál

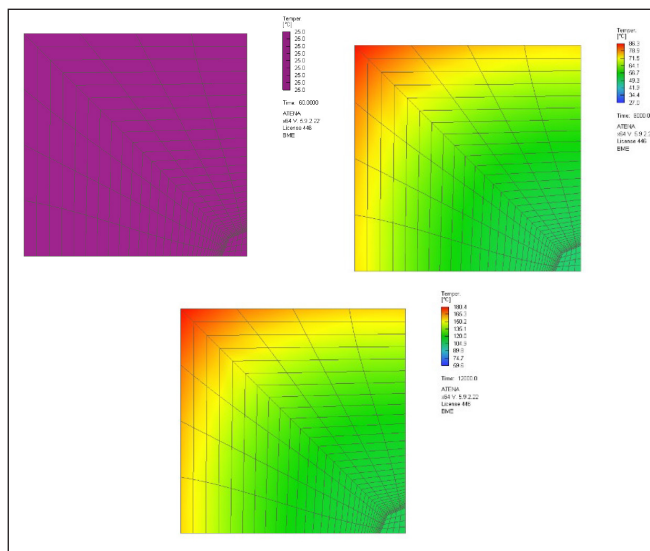
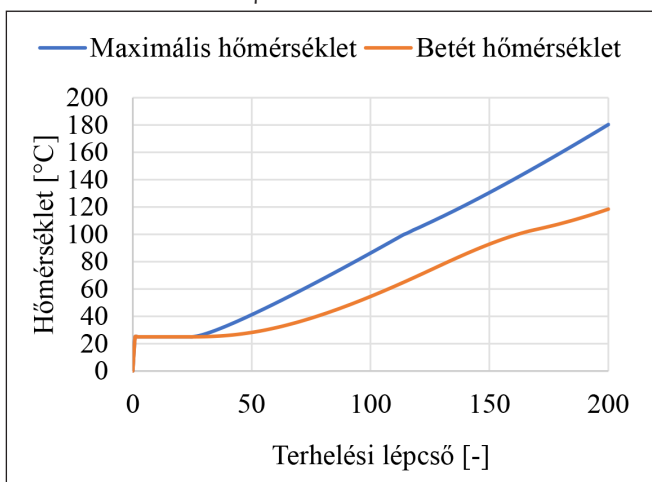


17. ábra: Repedések statikus terhelés hatására kihúzóási tönkremenetel közelében

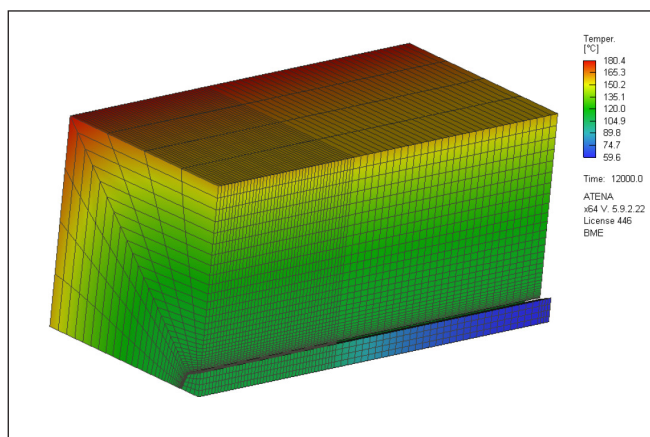
A modell konvergencia és futási idő optimalizálásának érdekében ez a módosítás nem lett elvégezve, a kialakulást követő fix repedésirányt alkalmaztunk.

A kapott eredményeket tovább validálják a repedéseképek. A 16. ábrán láthatóak a kis terhelő erőnél (~tönkremeneteli teher 20%-a) kialakult repedések, és a kihúzóási tönkremenetelnél kialakult repedések. Az utóbbi esetben a betonfogak már lényegében elnyíródtak, és a betét szabadon ki tud húzódni (csak a súrlódási ellenállás nyújt maradé ellenállást).

18. ábra: A betétben ébredő maximális hőmérséklet összevetése a maximális hőmérséklettel a próbatestben



19. ábra: Hőmérséklet változása a keresztmetszeten belül.



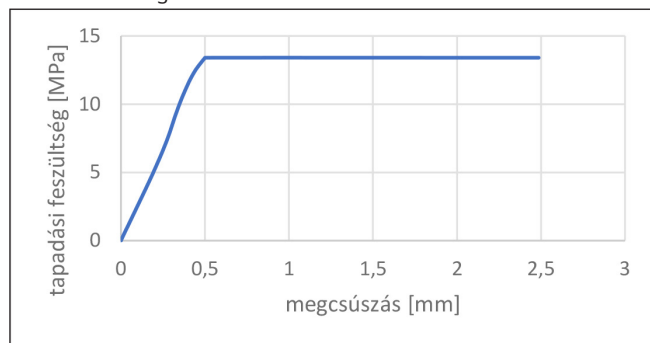
20. ábra: Hőmérséklet változása a próbatesten belül

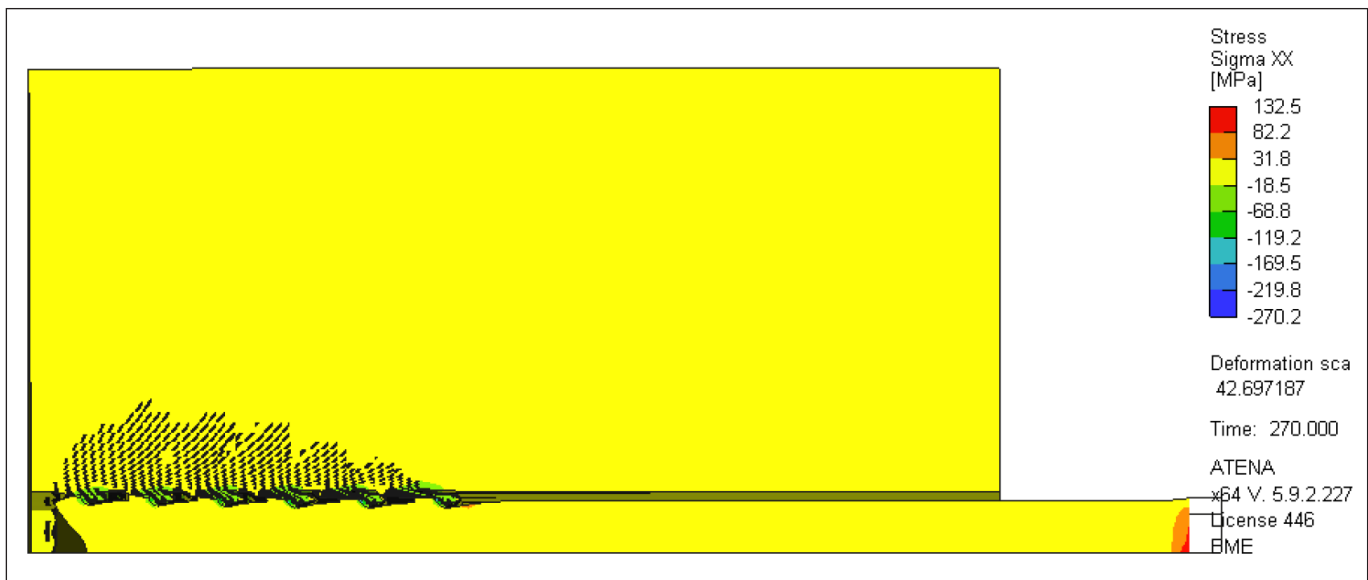
A validált kihúzó kísérleti modell elkészítése után a következő lépésben a kész modell üzemi teherszintre lett terelve, majd a beton próbatest felszínére hőmérsékleti teher lett definiálva. A hőmérsékleti terhelés közben a betétben lévő hőmérséklet és a maximális hőmérséklet alakulásának összehasonlítását a 18. ábra mutatja be. Látható, hogy a betétben a hőmérséklet lényegében mindig 50-60 °C-kal alulmaradt.

A hőmérséklet emelése során a maximális terhelő hőmérsékletnél a hőmérséklet eloszlását a próbatesten belül a 19. és 20. ábrák mutatják be. A beton belseje felé haladva a hőmérséklet folyamatosan csökkent.

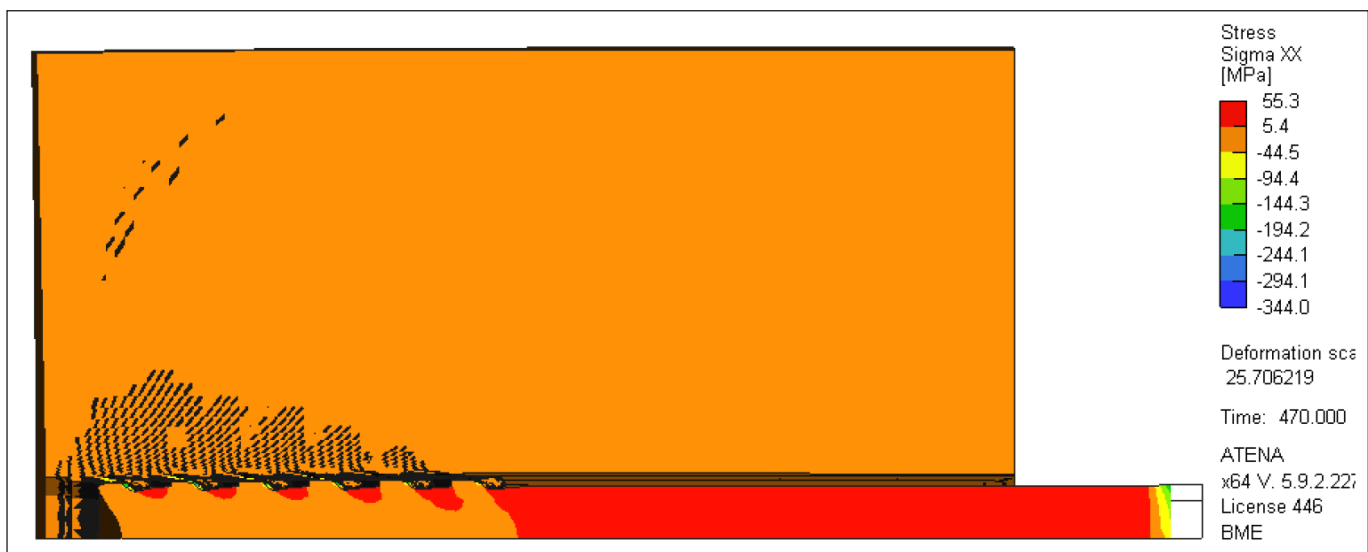
A hőmérséklet emelésével párhuzamosan a mátrix és beton anyagi tulajdonságai romlottak. A 21. ábrán látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével ahogyan lágyult a beton-betét kapcsolat, a terheletlen oldalon mért megcsúszások is egyre növekedtek.

21. ábra: A megcsúszás növekedése a hőmérséklet emelésével





22. ábra: Repedéskép és feszültségeloszlás a statikus terhelés végén



23. ábra: Repedéskép és feszültségeloszlás a hőmérsékleti terhelés végén (tönkremenetel)

A statikus terhelés végén kialakuló repedésképet és feszültségeloszlást a 22. ábra szemlélteti, míg a hőmérsékleti terhelés során kialakuló kihúzóási tönkremenetel pillanatában ezt a 23. ábra mutatja be. A repedések száma és kiterjedése megnőtt, a tönkremenetele azonban nem a betonfogak elnyíródásával következett be, hanem a GFRP betét bordáinak kilágylásával. Kellően magas hőmérsékletnél a bordák annyira lágyak lettek, hogy a betét kicsúszott a beton próbatestből, csak a súrlódás biztosított maradó ellenállást.

6. KONKLÚZIÓK

GFRP betétek alkalmazása egyre elterjedtebb az olyan esetekben, ahol a tartósság kiemelten fontos, vagy a szerkezet agresszív környezetnek van kitéve. A GFRP betétek anyagi összetételükből fakadóan mentesülnek az elektrolitikus korrózió alól. Felhasználásukat azonban nehezíti a mátrix anyag alacsony üvegesedési hőmérsékletéből fakadó problémák. Amennyiben a GFRP betét felhasználásával készült beton szerkezetek ki vannak téve magas üzemi hőmérsékleteknek, vagy rendkívüli tűzhatásoknak, akkor megkérdőjeleződik a GFRP alkalmazhatósága, vagy külön hőszigetelésre, hógátló anyagok alkalmazására lehet szükség.

A GFRP betétek két legfontosabb tulajdonságát vizsgáltuk

a cikkben: a mechanikai és tapadási tulajdonságok, üzemi teherszint alatt, egyenletes hőmérséklet emelésével. A vizsgálat elvégzéséhez nemlineáris végeelemes modellek készültek ATENA szoftverkörnyezetben, ahol a mátrix és a beton térfogatelemekkel lettek definiálva, a szálak pedig beágyazott vonalelemekként jelentek meg. Két kísérleti elrendezés lett vizsgálva, egy szakító és egy kihúzó kísérletei elrendezés. Mindkét esetben egy 12 mm átmérőjű Schöck Combar nevű GFRP termék volt a vizsgálat alanya, ami rovátkolt felületi kialakítású.

Az eredmények azt mutatták, hogy állandó húzóerő mellett, a hőmérséklet emelésével a betét keresztmetszetén belül az átlagfeszültség nem változik, viszont a mátrix rugalmassági modulusának csökkenése a shear lag hatást növeli, azaz a feszültségkülönbség a középső és a legjobban terhelt szélső szál között megnőtt. Így a hőmérséklet további emelésével a szélső kritikus szálban a feszültség megnőtt, majd amikor elérte a szál szakítószilárdságát progresszív tönkremenetel következett be, mígnem a teljes keresztmetszet elszakadt.

A kihúzó kísérlet során a betét bordázata egyszerűsített módon térfogatelemekkel lett modellezve. Így meg lehetett vizsgálni a hőmérséklet növekedésével bekövetkező GFRP borda lágyulásának hatását a tapadásra. A hőmérséklet emelésével a kapcsolat merevsége lecsökkent, a terheletlen oldalon a megcsúszások folyamatosan emelkedtek. A repedé-

sek is tágultak és terjedtek a betonban, azonban a tönkremenetel a statikus terheléssel ellentétben nem a betonfogak nyírási tönkremenetelével következett be, hanem a GFRP bordák kilágylásával. A betét a bordák merevségének elvesztése után kihúzódott a betonból, csak a súrlódás nyújtott maradó ellenállást.

Összességében elmondható, hogy a validált numerikus modellek alkalmasak voltak a GFRP betét viselkedésének vizsgálatára hőmérsékleti terhelés hatására. A kapott eredmények további validálása szükséges laboratóriumi eredményekkel, valamint a létrehozott modellekkel további vizsgálatok hajthatók végre annak érdekében, hogy a GFRP betéteket magasabb, vagy rendkívüli hőmérsékleti terhelések mellett is alkalmazni lehessen.

7. KÖSZÖNET NYILVÁNÍTÁS

A cikk Szél Stefánia Mária 2025-ben beadott és megvédett diplomamunkát mutatja be, összefoglalva annak céljait, megoldási mechanizmusát és konklúzióját. Szeretnénk köszönetet mondani Szinvai Szabolcsnak, hogy vállalta a konzulensséget a diplomamunkámnak, és egész félév alatt biztatott és támogatta a munkámat, hogy ez a legtöbbet tudjam kihozni ez idő alatt a témából.

A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.

„A BME-380 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az EKÖP-24-3 pályázati program finanszírozásában valósult meg.



8. HIVATKOZÁSOK

Bank, L., C. (2006). „Composites for Construction.” *John Wiley & Sons*, <https://doi.org/10.1002/9780470121429>

CSA, S806-12. (2021). „Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers.” *Canadian Standards Association*

ASTM, D7205/D7205M. (2011). „Test Method for Tensile Properties

of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars.” *American Society for Testing and Materials*

ACI, 440.1R. (2015). „Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.” *American Concrete Institute*

Schöck. (2022). „Combar Brochure.” *Schöck Bauteile GmbH*

Szinvai, S., & Kovács, T. (2024). „Numerical modeling of the shear lag effect in GFRP as function of fiber content.” *Pollack Periodica*, 20(2), 1-7. <https://doi.org/10.1556/606.2024.01049>

Szinvai, S., & Kovács, T. (2022). „Numerical modelling of the bond behaviour between uncracked concrete and deformed steel and fibre reinforced polymer bars.” *Proceedings of the 14th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, 621-628, <https://www.fib-international.org/publications/fib-proceedings/14th-phd-symposium-in-rome-italy-2022-proceedings-em-pdf-em-detail.html>

Szél Stefánia Mária (2000) okleveles építőmérnök, Acélhidak Kft. Minőségellenőrzési Osztály (MEO). A BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén diplomázott 2025-ben. Fő érdeklődési területek: hidak tervezése és kivitelezése, különös tekintettel a gyakorlati kérdésekre, hidak építése és gyártás közbeni ellenőrzése.

Szinvai Szabolcs (1997) okleveles építőmérnök, PhD hallgató, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék. Fő érdeklődési területek: szálerősítésű polimerek alkalmazása betonszerkezetekben, középpontban a tapadási kérdésekkel és a szerkezeti viselkedéssel. *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Ifjúsági Tagozatának vezetője, *fib* TG10.3 és TG5.1 mukacsoport tagja.

Finite Element Investigation of the Bond and Mechanical Behavior of GFRP Bars Exposed to Elevated Temperatures

Mária Stefánia Szél - Szabolcs Szinvai

Corrosion reduces the service life of traditional steel-reinforced concrete structures. In cases where durability is critical or the structure is exposed to an aggressive environment, the use of non-metallic reinforcement may be a solution, as these materials are inherently immune to electrolytic corrosion. One such material is glass fiber reinforced polymer (GFRP). In addition to their excellent durability properties, GFRP bars are lightweight, easy to cut, and non-magnetic, allowing for a wide range of applications. However, for structures exposed to elevated temperatures, the relatively low glass transition temperature of the matrix material can present a problem. In this paper, the mechanical and bond behavior of GFRP bars subjected to thermal loading was investigated using numerical simulation. Nonlinear finite element models were developed in the ATENA software, where the matrix and the concrete were modeled with solid elements, while the fibers were represented as embedded line elements. Due to the elevated temperature, the elastic modulus of the matrix decreased, significantly reducing the efficiency of force transfer between the fibers within the models, which resulted in a loss of stiffness and tensile strength. Matrix properties also influence bond performance. The results showed that with increasing temperature, the relative displacements between the concrete and the reinforcement increased progressively, until a critical temperature was reached at which bond failure occurred.

ZÚZOTT BETON TÉRKŐ, MINT ÚJRAHASZNOSÍTOTT ADALÉKANYAG HATÁSA A BETON SZILÁRD-SÁGÁRA ÉS HŐÁLLÓSÁGÁRA



<https://doi.org/10.32969/VB.2025.4.2>

Dr. Hlavicka Viktor – Dr. Majorosné dr. Lublóy Éva Eszter

A vizsgálat célja a beton térkő aprításából származó újrahasznosított adalékanyag hatásának elemzése az újrahasznosított beton mechanikai tulajdonságaira és hőállóságára. Öt keveréket készítettünk, amelyek közül négy tartalmazott törtbetont 20% és 50% adalékanyag térfogat arányban, külön vizsgálva a durva frakció, valamint a durva és finom frakció együttes helyettesítését. A kutatás során nyomószilárdsági és hajlító-húzószilárdsági vizsgálatokat végeztünk a hőterhelés (150–600 °C) előtt és után. Az eredmények szerint a durva frakció törtbetonra való cseréje nem csökkentette jelentősen a szilárdságot, sőt 50 V% tartalom esetén kedvező hatás mutatkozott. Ezzel szemben a finom frakció bevonása minden esetben gyengítette a beton tulajdonságait. A durva frakciót tartalmazó keverékek 450 °C-on nagyobb maradó szilárdságot mutattak, míg a finom frakcióval kiegészített keverékek kisebb ellenállást tanúsítottak. Összességében az újrahasznosított adalékanyag alkalmazása kedvező lehet, ha a finom frakció aránya minimális.

KULCSSZAVAK: beton újrahasznosítás, újrahasznosított beton adalékanyag, hőállóság, beton nyomószilárdság, beton hajlító-húzószilárdság, hőterhelés utáni maradó szilárdság

1. BEVEZETÉS

Az építőipar egyik legnagyobb mennyiségben használt anyaga a beton, amiből mind a szerkezetépítés, mind a közmű vagy infrastruktúra építés területén kiemelkedően nagy mennyiséget állítunk elő és építünk be. A Global Cement and Concrete Association felmérése alapján 2020-ban a világ összes beton előállítására 14 milliárd m³ volt (Global Cement and Concrete Association, 2023). A beton építőanyag előállításához alapvetően cementet, vizet és adalékanyagot használunk fel. Az évi több milliárd m³ beton előállításához így jelentős mennyiségű cement gyártására és adalékanyag kitermelésére van szükség. Nem csoda, hogy a betonhoz szükséges adalékanyag bányászat a világ egyik legnagyobb mennyiségben bányászott ásványi anyaga lett. Csak Európában (EU+EFTA) 2019-ben a beton előállításához kitermelt adalékanyag (bányászattal vagy kotrással) mennyisége 2644 millió tonna volt (European Aggregates Association, 2023a). Könnyen belátható, hogy ez a mennyiségű természetes adalékanyag felhasználás hosszútávon nem fenntartható. Ezért a jövőben a természetes adalékanyag bizonyos mennyiségű kiváltására lesz szükség.

Az építőipar napjainkban is zajló modernizációja a nagyfokú digitalizálás és robotizálás mellett egyre nagyobb hangsúlyt szentel az alkalmazott anyagok körforgásának biztosítására. Ezért a beton esetén is egyre nagyobb az elvárás a beton anyagának újra felhasználására. Erre az egyik legelterjedtebb módszer a betonzúalék adalékanyagként való felhasználása, új vasbetonszerkezetek esetén, ezzel is mérsékelve a természetes adalékanyagok kitermelésének igényét. Ennek hatásaként az éves statisztikai adatokból is jól látható, hogy Európában évről évre egyre nagyobb százalékban kerül felhasználásra újrahasznosított beton adalékanyag. Egyes országok esetén ez az arány

már most kiemelkedően magas: Belgium 29,33%, Hollandia 24,73%, Nagy Britannia 23,86%, Franciaország 16,79%, Németország 12,41% (European Aggregates Association, 2023b).

Megfelelő válogatás, és adalékanyag vizsgálat mellett hazai és nemzetközi tapasztalatok alapján ma már képesek vagyunk újrahasznosított beton adalékanyag felhasználásával az eredetihez képest legalább ugyan olyan, de akár jobb szilárdságú betont is előállítani (McNeil & Kang, 2013; B. Wang et al., 2021). Az erőtani szilárdság mellett azonban a betonnak a tartóssági követelményeknek is meg kell felelnie, mint pl. a szélsőségesen magas vagy alacsony hőmérsékleten, vagy kémiaileg agresszív közegben való ellenállás.

A vasbeton szerkezetek magas hőmérsékleten való ellenállásának fontosságára az utóbbi évek jelentős tüzesetei is felhívták a figyelmet: Gotthard alagút (2001); Grenfell Tower, London (2017); Torch Tower, Dubai (2017), Wang Fuk Court toronyház komplexum, Hong Kong (2025). A vasbeton szerkezetek tűzállóságát elsősorban a választott cement és különböző kiegészítő anyagok határozzák meg (metakaolin, kohósalak, műanyag szál). Azonban korábbi kutatások alapján az is látható, hogy beton magas hőmérséklet hatására történő szilárdságváltozására az adalékanyag típusának is jelentős hatása van (*fib BULLETIN* 38, 2007). Újrahasznosított beton adalékanyag használata esetén az eredeti beton paraméterei hatással lesznek az újrahasznosított beton tűzállóságára. Azonban ezek a hatások teljeskörűen még nem ismertek (Fernandes et al., 2021).

Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy beton térkő aprításából származó adalékanyag milyen hatással lesz az újrahasznosított beton szilárdságára és hőállóságára. A hatályos szabvány (MSZ 4798, 2016) előírja, hogy különböző környezeti osztályokban alkalmazott betonok esetén milyen

paraméterekkel kell rendelkeznie az újrahasznosított beton adalékanyagoknak. Aprózódás szempontjából a legszigorúbb határértékeket a fagyálló (XF), karbonátosodásnak ellenálló (XC) és kloridionnak ellenálló (XD) betonok esetén ad a szabvány. Így a zúzott térkövek a gyártástechnológiából és a nagy porozitásból adódóan ezen határértékeknek nem felelnek meg. Ennek következtében csak olyan betonok esetén lehet felhasználni adalékanyagként, aminek környezeti hatásoknak nem kell megfelelnie (X0). Jellemzően ilyen típusú betontól készülhetnek a beltéri tartószerkezetek: pillérek, gerendák, födémek. Ezért különösen fontos annak vizsgálata, hogy hogyan hat a törtbeton adalékanyag az újrahasznosított beton tűzállóságára.

A 2028-tól kötelező érvényű második generációs Eurocode (EN 1992-1-2, 2024) az újrahasznosított beton adalékanyag használhatóságát 20%-os határértékben szabja meg. A szabvány alapján a tűzállóság meghatározására 20% törtbeton tartalomig használhatók a szokványos betonok esetén alkalmazott képletek. 20% törtbeton tartalom felett laboratóriumi kísérletekre van szükség. Ezért kísérletsorozatunkat úgy állítottuk össze, hogy megvizsgáljuk a törtbeton adalékanyag hatását 20 és 50% tartalom esetén. Továbbá külön vizsgáltuk annak hatását is, amikor csak a durva frakció, vagy együttesen a durva és a finom frakció is kiváltásra kerül törtbetonnal.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS A VIZSGÁLATOK SORÁN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

2.1 Kísérleti program

A 1. ábra vizsgálatokhoz használt térköveket mutatja be. Mindegyik típus azonos technológiával (extrudálás) készült. Tervezett összetételük közel azonos. A vizsgálatokhoz használt térkövek különféle, a minősítéshez használt vizsgálatok után, vagy a gyártásból nem megfelelésük révén maradtak meg. Ebből adódóan a vizsgált térkövek nem kerültek beépítésre, a használatból származó különféle szennyeződések nem tartalmaztak.

A beton térköveket a törtbeton elkészítéséhez pofás törő segítségével aprítottuk. Az így keletkezett törtbetont négy részre bontottuk méret szerint. Továbbá megmértük a törtbeton szemmegoszlását, vízfelszívását és testsűrűségét. A törtbeton tulajdonságainak figyelembevételével négy eltérő újrahasznosított betonkeveréket készítettünk, amit referenciaként kiegészítettünk további egy keverékkel, ami nem tartalmazott törtbetont.

A keverékekből 70x70x250 mm névleges geometriájú

1. ábra: Beton térkövek



hasábokat készítettünk. A próbatesteket vegyes körülmények (7 napos koráig vízben, majd 28 napos koráig laboratóriumi körülmények között) között tároltuk a hatályos előírásoknak (MSZ 4798, 2016) megfelelően. A próbatesteket minden keverék esetén két részre osztottuk. Egyik részét 28 napos korukban vizsgáltuk. A másik részét 24 napos koruktól 4 napon keresztül szárítottuk 60 °C-on. A szárítás célja az volt, hogy a hőterhelés során elkerüljük a próbatestek robbanásszerű tönkremenetelét. A robbanásszerű tönkremenetel elsődleges oka a beton magas víztartalma (Bošnjak, 2014; fib BULLETIN 38, 2007). A szárítás következtében csökkenteni tudtuk a beton nedvességtartalmát. Azonban a víztartalom csökkenése hatással lehet a beton szilárdulására is. Ezért a kiértékelés során külön vizsgáltuk a szárítás hatását a szárított és a nem szárított próbatestek szilárdságának összehasonlításával.

A szárított próbatestek egy részét hőterheltük. A hőterhelésnél négy hőlépcsőt alkalmaztunk (150, 300, 450, 600 °C). Minden hőlépcső esetén 3-3 db próbatestet vizsgáltunk. A hőterheléshez elektromos kemencéket használtunk. A kemencék felfűtési sebessége 5-6 °C/perc volt. A próbatesteket minden hőmérsékleti lépcsőn 2 órán keresztül hőtartottuk, hogy a teljes keresztmetszet átvegye a választott hőmérsékletet. Minden esetben megmértük a próbatestek tömegét a hőterhelés előtt és után is. A hőterhelt próbatesteken a mechanikai vizsgálatokat visszahűlt állapotban, a hőterhelést követő napon végeztük el.

A nem szárított, a szárított és a hőterhelt próbatesteken előbb hárompontos hajlító vizsgálatot végeztünk a hatályos szabvány alapján (MSZ EN 12390-5, 2009). Majd a hajlítás után megmaradt félhasábokon nyomószilárdság vizsgálatot is végeztünk. Ez a fajta nyomószilárdság vizsgálat eltért a betonoknál alkalmazott előírástól (MSZ EN 12390-3, 2009), azonban saját vizsgálataink azt bizonyították, hogy 11,2 mm-es maximális szemcse nagyság esetén a félhasábokon és a 150 mm élhosszúságú kockákon mért nyomószilárdság értéke közel megegyezik (Hlavička, 2021).

A kísérlet során alkalmazott vizsgálatok sorrendjét a 2. ábra szemlélteti.

2.2 Alkalmazott anyagok

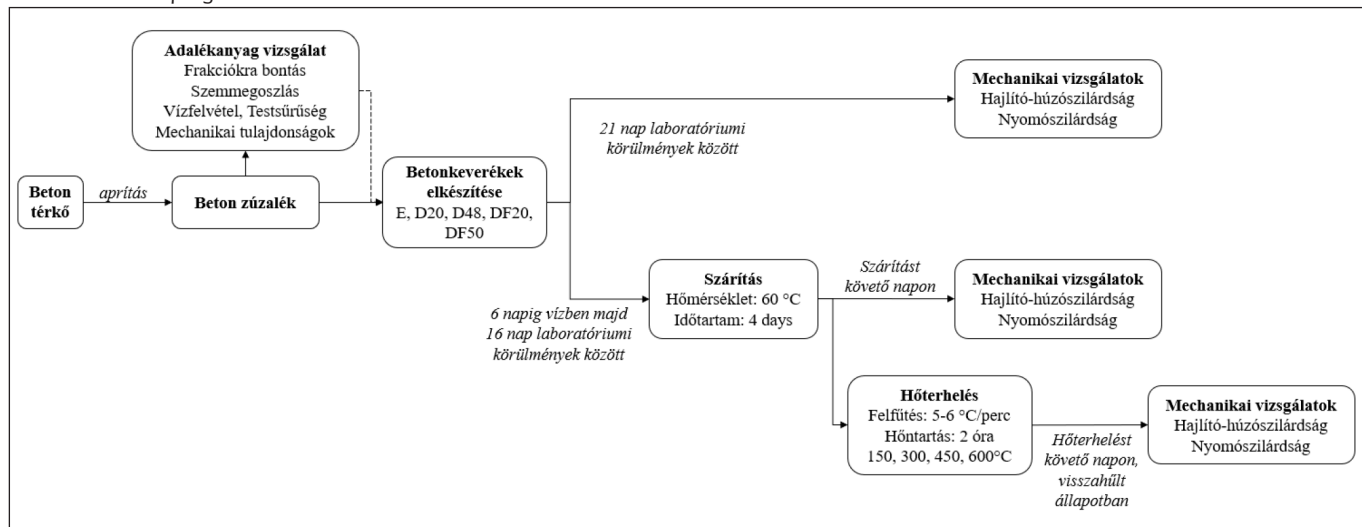
2.2.1 Cement

Az újrahasznosított betonok elkészítéséhez CEM I 32.5 N-LH cementet alkalmaztunk. Az alkalmazott cement kémiai összetételét az 1. táblázat foglalja össze. Az összetételre vonatkozó vizsgálatokat a gyártó végezte el a hatályos szabvány (EN 196-2, 2013) alapján.

1. táblázat: Az alkalmazott cement kémiai összetétele

Cement típus	Kémiai összetevők	
	Összetevők	Tartalom [m%]
CEM I 32.5 N-LH	Si O ₂	19,63
	Al ₂ O ₃	4,85
	Fe ₂ O ₃	3,81
	Ca O	65,32
	Mg O	1,39
	S O ₃	3,11
	Na ₂ O	0,36
	K ₂ O	0,59

2. ábra: Kísérleti program



2.2.2 Természetes adalékanyag

A betonkeverékek elkészítéséhez folyami kotrásból származó homokot (0/4 mm frakció), és kvarc kavicsot (4/8 mm frakció) használtunk természetes adalékanyagként. Az alkalmazott homok és a kavics szemmegoszlását az 3. ábra szemlélteti.

2.2.3 Újrahasznított adalékanyag

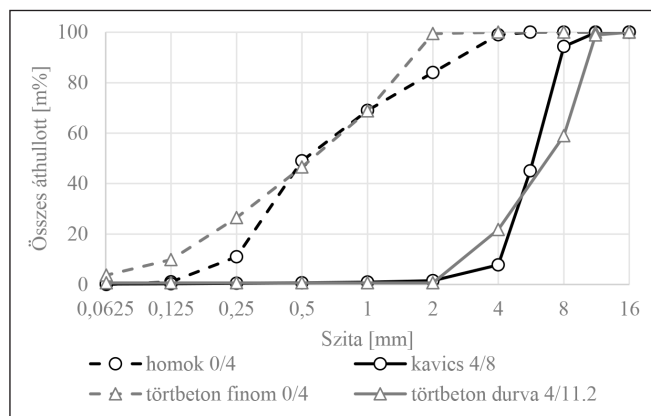
A beton térkövek aprítása után a törtbetont szétszittaltuk. Négy különböző kategóriát különítettünk el:

- < 0,063 mm;
- 0,063 – 4 mm (0/4 frakció);
- 4 – 11,2 mm (4/11,2 frakció);
- 11,2 mm <.

Ebből a vizsgálatok során csak a 0/4 és a 4/11,2 frakciók kerültek felhasználásra. Ehhez elvégeztük a két újrahasznított beton adalékanyag frakció szemmegoszlás vizsgálatát is a hatályos szabvány (MSZ EN 933-2, 2020) alapján. Az újrahasznított 0/4 és a 4/11,2 frakciók szemmegoszlását az 3. ábra szemlélteti.

A szitavizsgálat eredményei alapján látható, hogy a természetes és a törtbeton adalékanyag frakciók szemeloszlása nem tér el nagymértékben egymástól. Így a különböző frakciók jól kiegészíthetők egymással.

Az újrahasznított adalékanyagot tartalmazó betonrecep-



3. ábra: Alkalmazott adalékanyagok szemeloszlása

túrák elkészítéséhez szükséges volt a zúzott adalékanyag testsűrűségének és vízfelvételeinek megállapítása is. A szükséges tulajdonságok meghatározását a 4/11,2 frakcióból vett mintákon végeztük szabványos (MSZ EN 1936, 2007) piknométeres vizsgálattal. Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: Törtbeton vízfelszívása és testsűrűsége

Adalékanyag	Vízfelvétel [m%]		Testsűrűség [g/cm ³]	
	30 perces	24 órás	látszólagos	száritott
törtbeton (4/11,2 mm)	2,15	2,2	2,5	2,37

4. táblázat: Beton receptúrák 1 m³ keverékre vonatkoztatva

		Keverék				
		E	D20	D48	DF20	DF50
Adalékanyag [kg/m ³]	homok 0/4	946,2	946,2	946,2	764,2	582,3
	kavics 4/11	873,4	509,5	-	691,4	327,5
	törtbeton 0/4	-	-	-	172,0	344,0
	törtbeton 4/11,2	-	344,0	825,5	172,0	515,9
	törtbeton arány	0%	20%	50%	10+10=20%	20+30=50%
Cement (CEM I 32,5 N-LH) [kg/m ³]		390,0	390,0	390,0	390,0	390,0
Víz [kg/m ³]		175,5	175,5	175,5	175,5	175,5
v/c		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Többletvíz [kg/m ³]		-	7,57	18,16	7,57	18,92
Folyósítószer [kg/m ³]		1,8	1,7	2,2	2,1	1,5

Jelen vizsgálatok során a finom törtbeton (0/4 mm) vízfelvétel és testsűrűség vizsgálatát külön nem végeztük el. A beton receptúrák összeállításánál azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a finomrész vízfelvétele és testsűrűsége megegyezik a durva frakció tulajdonságaival.

A törtbeton durva frakciójának mechanikai tulajdonságainak meghatározásához Los-Angeles (MSZ EN 1097-2, 2020) és micro-Deval (MSZ EN 1097-1, 2024) vizsgálatokat is végeztünk. A vizsgálatok eredményeit a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat: Törtbeton mechanikai jellemzői

Adalékanyag	Frakció	Lemorzsolódási veszteség [m%]	
		Los-Angeles	micro-Deval
törtbeton	4/8 mm	34,1	24,6
	8/11,2 mm	40,6	20,9

2.3 Alkalmazott betonreceptúrák

A vizsgálatokhoz összesen 5 db eltérő betonkeveréket készítettünk, ebből négy keverék tartalmazott törtbetont adalékanyagként. Az újrahasznosított betonkeverékek esetén külön vizsgáltuk a finom és a durva frakciójú törtbeton hatását, úgy, hogy két keverék esetén csak a durva frakció lett helyettesítve törtbetonra (D20, D48). A másik két keverék esetén pedig a finom és a durva frakció is törtbetonnal lett helyettesítve (DF20, DF50). Ennél a két keveréknél a finom és a durva frakció helyettesítési térfogat aránya összességében egyezett meg a másik két keveréknél alkalmazott helyettesítési térfogat aránnyal: 20% és 50%.

A törtbeton nélküli keverék (E) esetén a természetes adalékanyagok térfogat aránya úgy lett kiválasztva (0/4 mm 52%, 4/8 mm 48%), hogy a keverék szemmegoszlása köze-

lítse a szabványos B görbét (MSZ 4798, 2016) (4. ábra). Az újrahasznosított betonok esetén a természetes és az újrahasznosított adalékanyagok aránya úgy lett meghatározva, hogy a keverékek szemmegoszlása minél jobban közelítse a törtbeton felhasználása nélkül készült keverék (E) szemmegoszlását (5. ábra). Ezzel törekedtünk arra, hogy a vizsgálatok során kizárjuk az eltérő szemmegoszlás hatását a beton szilárdságára.

Az újrahasznosított betonok receptúráinak összeállításánál figyelembe vettük a törtbeton vízfelszívását is. A keverés során a betonhoz többletvizet adagoltunk, amit a törtbeton 30 perces vízfelszívása alapján számítottunk ki az újrahasznosított beton adalékanyag adagolása alapján. A vizsgálat során alkalmazott betonkeverékek összetételét a 4. táblázat foglalja össze.

A friss beton előállítása során a folyósítószer fokozatosan adagoltuk a keverékhez úgy, hogy a beton konzisztenciája terülméremmel ellenőrizve minden esetben az F3 kategóriának (MSZ EN 12350-5, 2009) feljen meg. A keverékekből készült próbatesteket másnap kiszalasztuk, majd 7 napos korig víz alatt, majd azt követően 21 napig labor körülmények között tároltuk a hatályos előírásoknak (MSZ 4798, 2016) megfelelően.

3. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A következő fejezetekben a vizsgálatok eredményeit mutatjuk be és hasonlítjuk össze különböző szempontok alapján. A kísérlet során a hőterhelésnek kitett próbatesteket a hőterhelés előtt szárítottuk, hogy a hőterhelés alatt elkerüljük a próbatestek robbanásszerű tönkremenetelét. Ennek ellenére a DF20 keverék esetén a 600 °C-on hőterhelt próbatestek a hőterhelés során felrobbantak. Így azokon a próbatesteken további vizsgálatokat nem tudunk elvégezni.

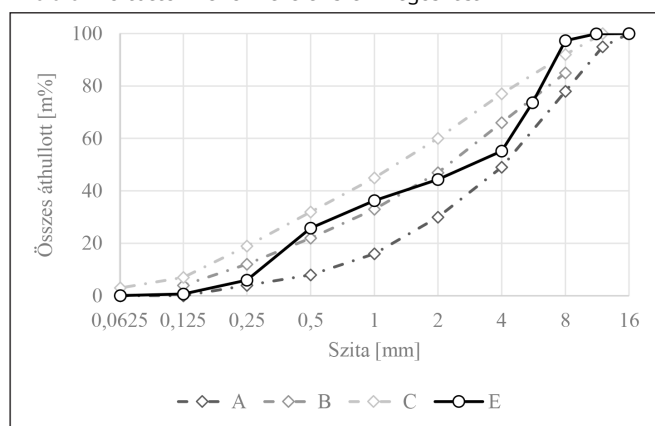
3.1 Törtbeton adagolás hatása a beton szilárdságára

A hőterhelés nélküli próbatesteken elvégzett nyomószilárdság és hajlító-húzószilárdság vizsgálatok eredményeit a 6. és 7. ábra foglalja össze. Nyomószilárdság esetén minden eredmény 6-6 mérés átlaga, míg hajlító húzószilárdság esetén minden eredmény 3-3 próbatesten végzett mérés átlaga

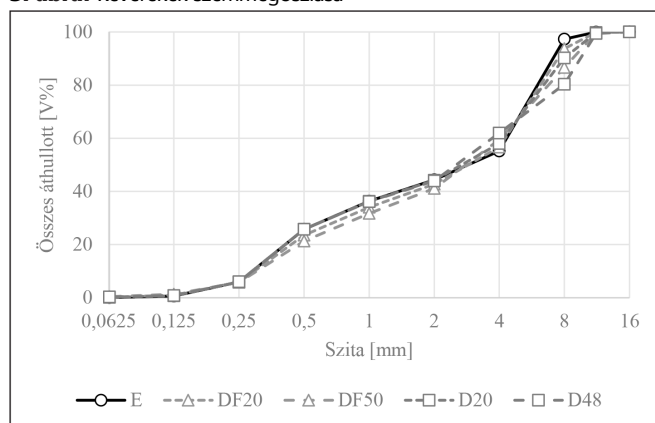
Az eredményekből látható, hogy a durva frakció törtbetonra való cserélése nem volt jelentős hatással a nyomószilárdság eredményekre. Az etalon keverékhez képest a 20% törtbeton durva frakció tartalom esetén a nyomószilárdság mindössze 3%-ot csökkent, míg 48% törtbeton durva frakció tartalom esetén a nyomószilárdság 1%-ot növekedett. Abban az esetben amikor a finom és durva frakciót is törtbetonra cseréltük a 20% zúzottbeton tartalom esetén szintén csak 3%-ot csökkent a nyomószilárdság. Azonban az 50% törtbeton tartalom (20% finom + 30% durva frakció) 11% nyomószilárdság csökkentést eredményezett.

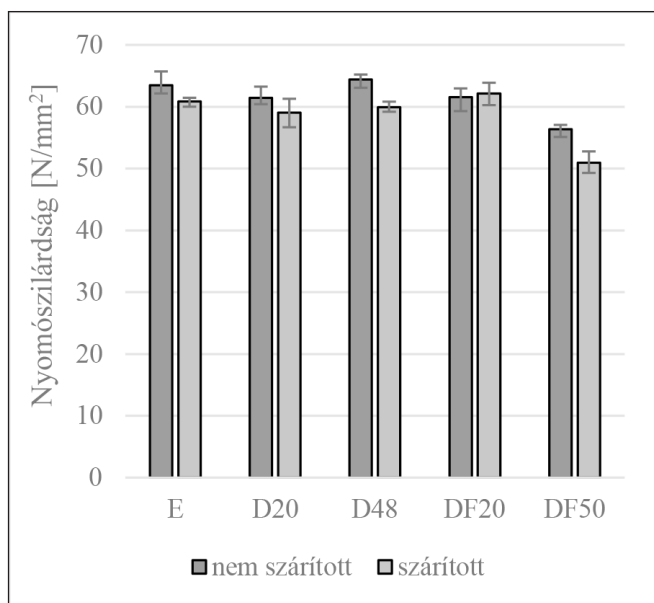
A nyomószilárdság változásával szemben a hajlító-húzószilárdság esetén a durva frakció törtbetonra való cserélése 20% törtbeton tartalom esetén 4%-al növelte a hajlító-húzószilárdságot. Ennek oka a törtbeton szemcsék alakjának hatása. Zúzott adalékanyag szemcsék jobban beékelődnek a cementkőbe ezért húzás esetén kis mértékben növelni tudják a beton szilárdságát (Chen et al., 2025; Kim, 2022). 50% törtbeton tartalom esetén viszont ez a hatás már nem érvényesült, a beton hajlító-húzószilárdsága 16%-al csökkent az etalon keverék szilárdságához képest. A finom és a zúzott frakciók együttes cseréje esetén a hajlító-húzószilárdság értéke már 20% törtbeton tartalom (10% finom + 10% durva frakció) esetén is csökkent 5%-al, majd 50% törtbeton tartalom (20% finom + 30% durva frakció) esetén 22%-al.

4. ábra: Törtbeton nélküli keverék szemmegoszlása

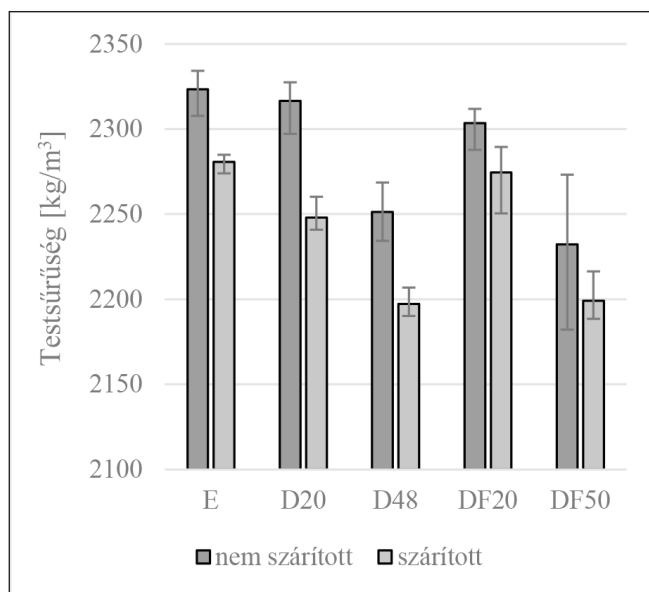


5. ábra: Keverékek szemmegoszlása

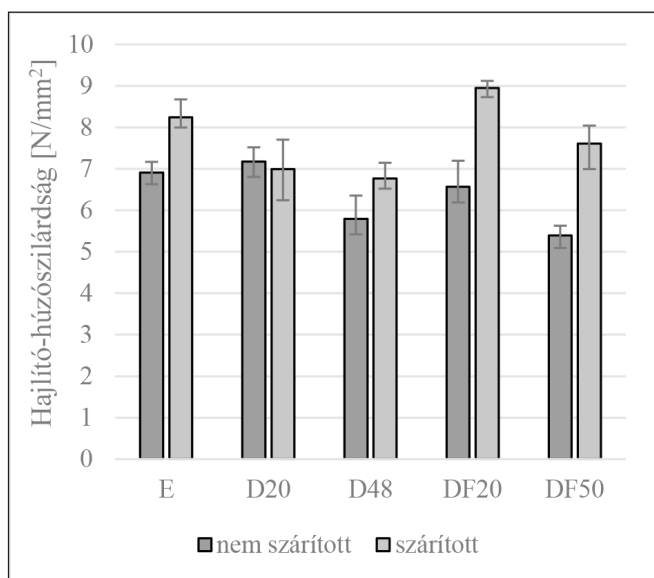




6. ábra: Törtbeton tartalom hatása a nyomószilárdságra



8. ábra: Szárítás hatása a testsűrűségre



7. ábra: Törtbeton tartalom hatása a hajlító-húzószilárdságra

3.2 Szárítás hatása a beton testsűrűségére és szilárdságára

A szárítás során csökkent a beton próbatetek testsűrűsége. A nem szárított és a szárított próbatetek testsűrűségét a 8. ábra szemlélteti. Minden eredmény 3-3 próbatesten végzett mérés átlaga.

A szárítás következtében mért testsűrűség csökkenés kevérenként eltérő volt. Az etalon keveréknél (E) a négy napos szárítás csak 1,84% testsűrűség csökkenést eredményezett. A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél a csökkenés 2,96% (D20) és 2,40% (D48) volt. Míg a durva és finom törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél a csökkenés 1,26% (DF20) és 1,48% (DF50) volt.

A beton szilárdságát befolyásolja a próbatest nedvességtartalma. Minél több a víz a beton pórusaiban annál kisebb lesz a beton nyomószilárdsága. Ennek oka, hogy a próbatest terhelésekor a benne lévő víz belülről feszíti a betont, aminek következtében mikro repedések jönnek létre, ezért csökken a beton nyomószilárdsága (Rossi, 1991; Rossi & Boulay, 1990). Ugyanakkor a cement hidratációjához vízre van szükség. Ezért a cementnek folyamatosan biztosítani kell a vizet a szilárdulás teljes ideje alatt. Kezdetben a víz utánpótlását utókezeléssel

kell biztosítani, később a hidratáció folytatásához elegendő a pórusokban megmaradt víz is (MSZ 4798, 2016; Rahimi et al., 2023). Ezért a próbatetek vizsgálatok előtti szárítása akár szilárdságcsökkenéssel is járhat.

A nem szárított és szárított próbatetek szilárdsági eredményeit a 6. ábra és a 7. ábra foglalja össze. Az eredmények alapján látható, hogy a szárítás csak kis mértékben volt hatással a nyomószilárdság eredményekre. A szárítás következtében a nyomószilárdság a különböző keverékek esetén csökkent, azonban a csökkenés mértéke csak 3-9%. Így a keverékek nyomószilárdsága esetén megállapítható, hogy szárításból adódó két hatás (víztartalom csökkenése, hidratáció lassulása) jelen vizsgálat során közel kiegyenlítette egymást. Ebből adódóan a szárításnak nem volt jelentős hatása a keverékek nyomószilárdságára.

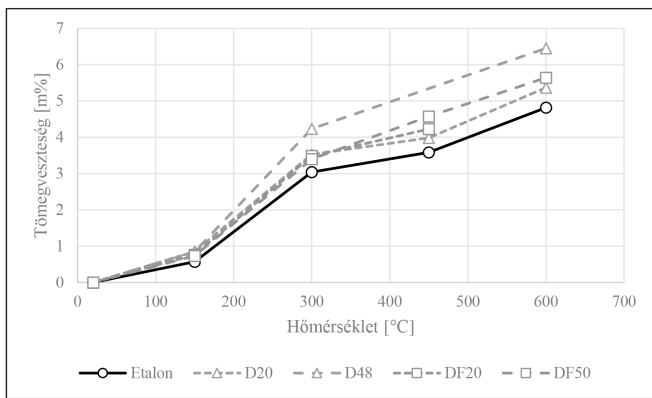
A nyomószilárdság eredményeknél tapasztaltakkal szemben a hajlító-húzószilárdság esetén a szárítás jelentős hatással volt az eredményekre. Szinte minden esetben a szárítás következtében nőtt a keverékek hajlító-húzószilárdsága. Az eredményekből látható, hogy az etalon keverék esetén a szilárdságnövekedés 19% volt. A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél kismértékű, 2% csökkenést tapasztaltunk a D20 keverék esetén, viszont a D48 keverék esetén a hajlító-húzószilárdság 17%-ot növekedett, míg a durva és finom törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknél a növekedés 36% (DF20) és 41% (DF50) volt. Az eredmények alapján elmondható, hogy a betonok hajlító-húzószilárdságát sokkal érzékenyebb a próbatest víztartalmára.

3.3 Törtbeton adagolás hatása a beton magas hőmérséklettel szembeni ellenállására

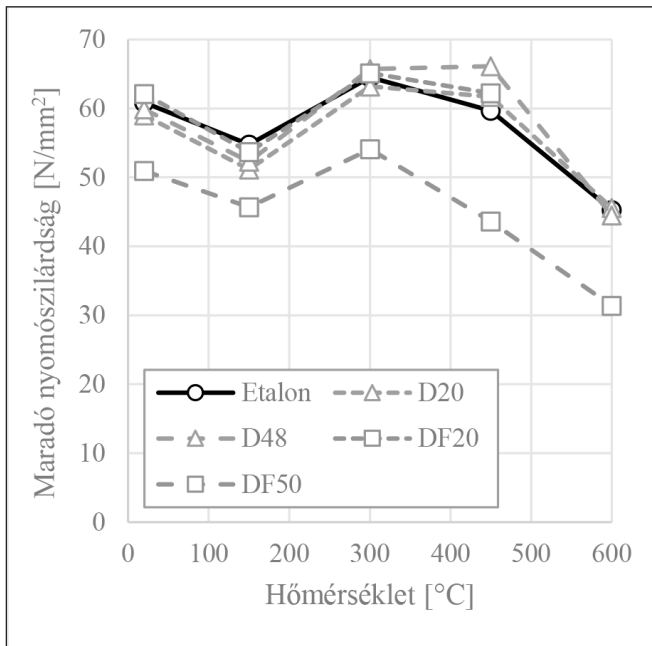
3.3.1 Tömegvesztés

A hőterhelés előtt és után is megmértük a próbatetek tömegét. A hőterhelésből származó tömegvesztéseket a 9. ábra szemlélteti.

A hőterhelésnek kitett próbateteket előzetesen szárítottuk. Ebből adódóan a 150 °C hőterhelés után mért tömegvesztés még nem volt jelentős, mindössze 0,6-0,8%. A legnagyobb ugrás a tömegvesztésben mind az öt keverék esetén 150-300 °C



9. ábra: Tömegvesztés a hőterhelés hatására



10. ábra: Maradó nyomószilárdság a hőterhelés függvényében

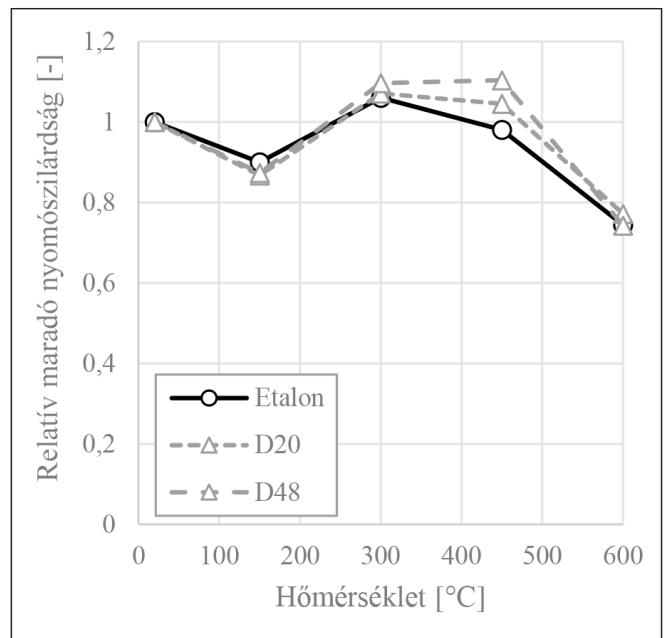
között következett be. Az eredményekből az is látható, hogy a törtbetont tartalmazó keverékek esetén a tömegvesztés minden esetben nagyobb volt, mint az etalon keverék esetén. Ennek oka törtbetont tartalmazó keverékek elkészítéséhez használt többletvíz elpárolgása. Továbbá a törtbeton tartalom miatt ezekben a keverékekben nagyobb a cementkötőanyag is. Így a 200 °C környezetében bekövetkező kalcium-szilikát hidrát (CSH) dehidratáció is nagyobb tömegvesztést okoz. 300 °C felett a törtbetont tartalmazó keverékek tömegvesztése közel párhuzamosan haladt az etalon keverék tömegvesztésével.

3.3.2 Nyomószilárdság

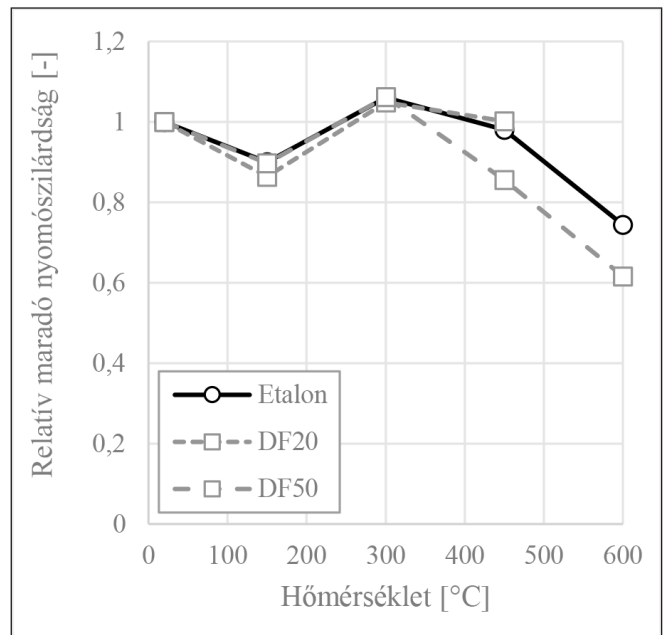
A hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság értékeit a 10. ábra foglalja össze. Minden eredmény 6-6 mérés átlaga. A relatív maradó nyomószilárdság értékeit a 11. ábra és a 12. ábra szemlélteti.

A hőterhelés hatására bekövetkező szilárdságváltozás tendenciája mind az öt keverék esetén hasonló: kezdetben a nyomószilárdság csökken, majd a 150 °C-nál mért lokális minimum pont után emelkedik, ezt követően 300-450 °C után a nyomószilárdság minden esetben csökken.

Irodalmi adatok alapján a 100-150 °C elérése után a nyomószilárdság emelkedése több fizikai okra is visszavezethető. A hőtágulás következtében az adalékanyag szemcsék kismértékben összefeszülnek, ami szilárdságnövekedést okozhat (Sólyom et al., 2017; Zhang & Bicanic, 2006). Ezen a hőmérsékleti tartományon a cementgél rétegei elmozdulnak,



11. ábra: Relatív maradó nyomószilárdság – D20, D48



12. ábra: Relatív maradó nyomószilárdság – DF20, DF50

aminek következtében nő a Wan der Waals erő (Malik et al., 2021; Naus, 2006). A még nem hidratálódott cement részecskéken ezen a hőmérsékleti tartományban hidratálódnak, ami szintén szilárdságnövekedést okozhat (Ma et al., 2015). A 100 °C utáni szilárdság növekedést követően 300 °C felett a kémiailag kötött víz is elpárolog, megkezdődik a CSH bomlása, ami porozitás növekedést és szilárdságvesztést eredményez (Pimienta et al., 2017). 400 °C felett megkezdődik a portlandit bomlása (Alonso & Schneider, 2019), majd 573 °C-on a kvarc hőtágulása (Waubke, 1973), ami tovább rontja a beton nyomószilárdságát.

A relatív maradó nyomószilárdság értékekből látható, hogy 300 °C-ig az öt keverék viselkedése közel megegyezik. Azonban 300 °C felett a törtbetont tartalmazó keverékek eltértek az etalon keverék viselkedésétől.

A csak durva törtbetont tartalmazó keverékek (D20, D48) 450 °C hőterhelés után jobb nyomószilárdságot értek el, mint az etalon keverék (11. ábra). A törtbeton tartalom növekedésével nőtt a maradó nyomószilárdság értéke. Ennek oka, hogy a törtbeton adalékanyag kedvezőbb hőtágulási tulajdonságokkal rendelkezik, ezért a hőterhelés hatására jobban együttműködik

a cementkövel, így kevesebb mikro repedés jön létre (Beatriz da Silva et al., 2020).

Ezzel szemben a durva és finom frakciójú törtbetont tartalmazó keverékek esetén 300 °C hőterhelés után a nyomószilárdság változása megegyezett (DF20) vagy alulmaradt (DF50) az etalon keverék szilárdságához képest (12. ábra). A törtbeton tartalom növelésével csökkent a maradó nyomószilárdság értéke. Ennek oka, hogy a finom rész tartalom növelésével növekszik az összesített cementkötő tartalma a keveréknek, ami gyorsítja a beton leromlását (Zega & Di Maio, 2009).

3.3.3 Hajlító-húzószilárdság

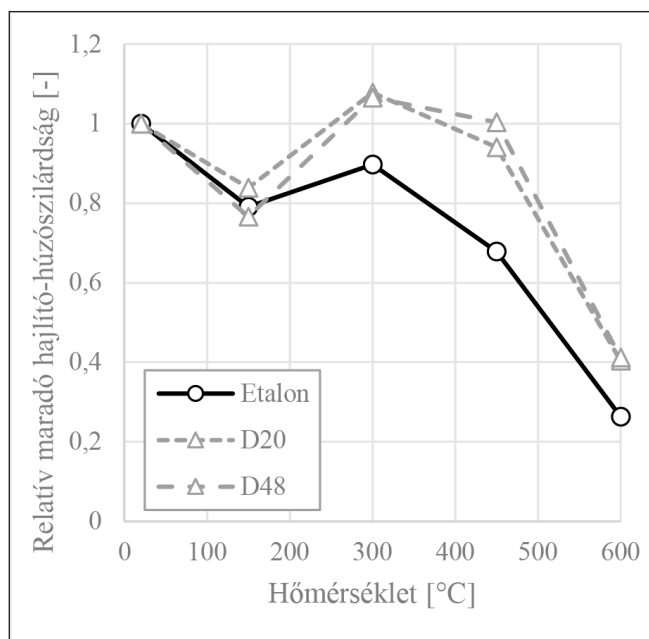
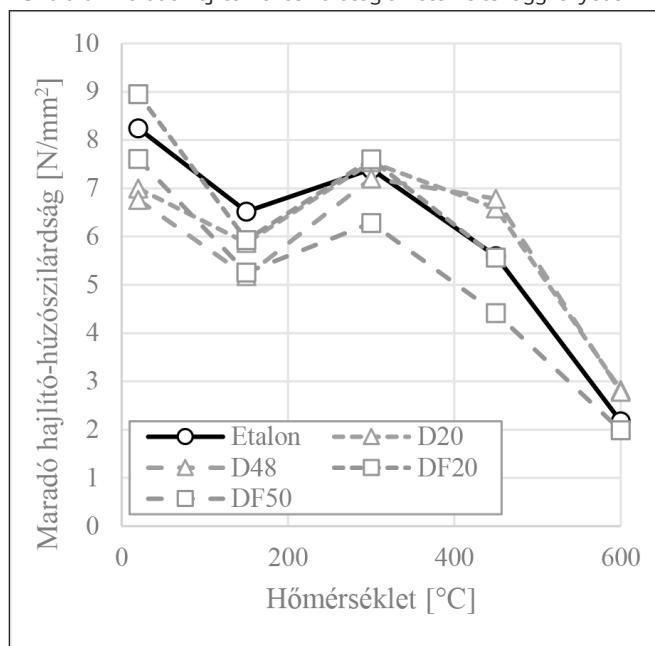
A hőterhelés utáni maradó hajlító-húzószilárdság értékeit a 13. ábra foglalja össze. Az ábrán bemutatott eredmények 3-3 próbatest átlaga. A relatív maradó hajlító-húzószilárdság értékeit a 14. ábra és a 15. ábra szemlélteti.

A hőterhelés hatására bekövetkező hajlító-húzószilárdság változás mind az öt keverék esetén hasonló tendenciát mutatott. Ebben az esetben is kezdeti szilárdságcsökkenés után, 150 °C felett újabb szilárdság növekedés figyelhető meg, majd 300 °C-tól a hajlító-húzószilárdság értéke rohamosan csökken. Megfigyelhető, hogy a hajlító-húzószilárdság érzékenyebb a hőmérsékleti teherre, mint a nyomószilárdság. A hőmérséklet emelkedésével a hajlító-húzószilárdság értéke egyértelműen csökken a kiindulási értékhez képest, mint az etalon, mint a betonüzalékot tartalmazó keverékek esetén. Ennek fő oka, hogy a hajlító-húzószilárdságot nagymértékben befolyásolják a hőterhelés következtében kialakuló mikro és makro repedések mennyisége (fib BULLETIN 38, 2007; Y. Wang et al., 2019).

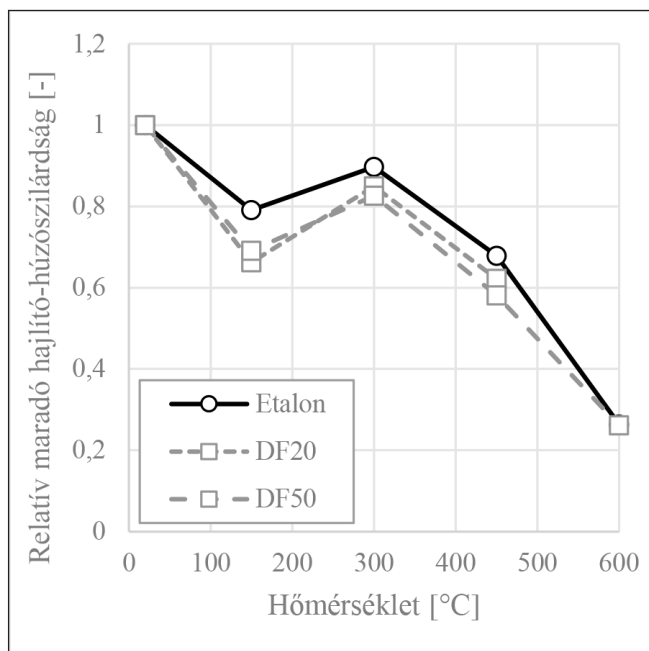
A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknel (D20, D48) ugyanúgy szilárdság növekedés tapasztalható az etalon keverékhez képest, (14. ábra) mint a nyomószilárdság esetén (11. ábra). Azonban ebben az esetben már 300 °C hőterhelés után is jelentős szilárdságnövekedés látható. A kedvezőbb hőtágulási együttdolgozás mellett ez a hatás visszavezethető a törtbeton adalékanyag alakjából származó jobb hajlító-húzószilárdság értékekre is (Sarhat & Sherwood, 2013).

A finom és durva törtbeton frakciókat tartalmazó keverékek esetén a maradó hajlító-húzószilárdsági értékek minden esetben alulmaradtak a referencia beton értékeihez képest. Ez a hatás

13. ábra: Maradó hajlító-húzószilárdság a hőterhelés függvényében



14. ábra: Relatív maradó hajlító-húzószilárdság – D20, D48



15. ábra: Relatív maradó hajlító-húzószilárdság – DF20, DF50

is visszavezethető a növekvő összesített cementkötő tartalom és az összesített kontaktfelületek növekedésével, ami fokozhatja a repedések kialakulását (Laneyrie et al., 2016).

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK

Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy beton térkö aprításából származó adalékanyag milyen hatással lesz az újrahasonosított beton szilárdságára és hőállóságára. A kísérletsorozatunkat úgy állítottuk össze, hogy megvizsgáljuk a törtbeton adalékanyag hatását 20 és 50% tartalom esetén. Továbbá külön vizsgáltuk annak hatását is, amikor csak a durva frakció, vagy együttesen a durva és a finom frakció is kiváltásra kerül törtbetonnal.

A vizsgálati eredmények alapján a következő megállapításokat tesszük:

- A durva frakció törtbetonra való cserélése nem volt jelentős hatással a nyomószilárdság eredményekre. Az etalon keverékhez képest 20% törtbeton durva frakció tartalom esetén

a nyomószilárdság mindössze 3%-ot csökkent, míg 48% törtbeton durva frakció tartalom esetén a nyomószilárdság 1%-ot növekedett.

- Abban az esetben amikor a finom és durva frakciót is törtbetonra cseréltük a 20% zúzottbeton tartalom esetén szintén csak 3%-ot csökkent a nyomószilárdság. Azonban az 50% törtbeton tartalom (20% finom + 30% durva frakció) 11% nyomószilárdság csökkentést eredményezett.
 - A hajlító-húzószilárdság esetén a durva frakció törtbetonra való cserélése 20% törtbeton tartalom esetén 4%-al növelte a hajlító-húzószilárdságot. 50% törtbeton tartalom esetén viszont ez a hatás már nem érvényesült, a beton hajlító-húzószilárdsága 16%-al csökkent az etalon keverék szilárdságához képest.
 - A finom és a zúzott frakciók együttes cseréje esetén a hajlító-húzószilárdság értéke már 20% törtbeton tartalom esetén is csökkent 5%-al, majd 50% törtbeton tartalom esetén 22%-al.
 - A szárítás csak kis mértékben volt hatással a nyomószilárdság eredményekre. A szárítás következtében a nyomószilárdság a különböző keverékek esetén csökkent, azonban a csökkenés mértéke csak 3-9%.
 - A hajlító-húzószilárdság esetén a szárítás jelentős hatással volt az eredményekre. Szinte minden esetben a szárítás következtében nőtt a keverékek hajlító-húzószilárdsága. Az eredmények alapján elmondható, hogy a betonok hajlító-húzószilárdságát sokkal érzékenyebb a próbatest víztartalmára.
 - A hőterhelés hatására bekövetkező nyomószilárdság változásának tendenciája mind az öt keverék esetén hasonló volt.
 - A csak durva törtbetont tartalmazó keverékek 450 °C hőterhelés után jobb nyomószilárdságot értek el, mint az etalon keverék. A törtbeton tartalom növekedésével nőtt a maradó nyomószilárdság értéke.
 - A durva és finom frakciójú törtbetont tartalmazó keverékek esetén 300 °C hőterhelés után a nyomószilárdság változása megegyezett vagy alulmaradt az etalon keverék szilárdságához képest. A törtbeton tartalom növelésével csökkent a maradó nyomószilárdság értéke.
 - A hőterhelés hatására bekövetkező hajlító-húzószilárdság változása mind az öt keverék esetén hasonló tendenciát mutatott.
 - A csak durva törtbeton frakciót tartalmazó keverékeknel hajlító-húzószilárdság növekedés tapasztalható az etalon keverékhez képest. Azonban ebben az esetben már 300 °C hőterhelés után is jelentős szilárdságnövekedés látható.
 - A finom és durva törtbeton frakciókat tartalmazó keverékek esetén a maradó hajlító-húzószilárdsági értékek minden esetben alulmaradtak a referencia beton értékeihez képest.
- Összességében megállapítható, hogy a finomrész törtbetonra való cseréje minden esetben rontotta az újrahaznosított beton tulajdonságait az etalon vagy a tisztán durva frakciójú törtbetont tartalmazó keverékekhez képest.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők szeretnék köszönetet mondani Somogyi Farkas Pálnak és Takács Krisztiánnak a laboratóriumi vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségért. Továbbá szeretnék köszönetet mondani Cseri Viktornak és a Duna-Dráva Cement Kft.-nek a vizsgálatok során használt cement biztosításáért. A cikk szerzői köszönetet mondanak a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2021-00252 "Innovatív, esztétikus, előregyártott, cementkötésű szénzál kompozit beton homlokzati és burkolati elemek kifejlesztése a MOLNÁRBETON Kft.-nél" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. A PD 146109 számú

projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az OTKA PD_23 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

6. HIVATKOZÁSOK

- Alonso, M. C., & Schneider, U. (2019). Degradation Reactions in Concretes Exposed to High Temperatures (pp. 5–40). https://doi.org/10.1007/978-3-319-95432-5_2
- Beatriz da Silva, J., Pepe, M., & Toledo Filho, R. D. (2020). High temperatures effect on mechanical and physical performance of normal and high strength recycled aggregate concrete. *Fire Safety Journal*, 117, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103222>
- Bošnjak, J. (2014). Explosive spalling and permeability of high performance concrete under fire – numerical and experimental investigations [PhD Thesis]. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- Chen, Y., Chen, C., Cai, Z., Zhu, P., Liu, R., & Liu, H. (2025). Effect of strength of parent concrete on utilization of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 103, 112187. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112187>
- EN 196-2. (2013). Method of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement.
- EN 1992-1-2. (2024). Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-2: Structural fire design .
- European Aggregates Association. (2023a). Annual Review 2020-2021. https://uepg.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf
- European Aggregates Association. (2023b). Annual Reviews. <https://uepg.eu/mediatheque/index/1.html>
- Fernandes, B., Carré, H., Mindeguia, J.-C., Perlot, C., & La Borderie, C. (2021). Effect of elevated temperatures on concrete made with recycled concrete aggregates - An overview. *Journal of Building Engineering*, 44, 103235. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103235>
- fib BULLETIN 38. (2007). Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling. Sprint-Digital-Druck.
- Global Cement and Concrete Association. (2023). CEMENT AND CONCRETE AROUND THE WORLD. <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>
- Hlavička, V. (2021). Comparison of the result of notched three point bending test with Model Code 2010 formulas. *Concrete Structures*, 22, 5–12. <https://doi.org/10.32970/cs.2021.1.2>
- Kim, J. (2022). Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction and Building Materials*, 328, 127071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127071>
- Laneyrie, C., Beaucour, A.-L., Green, M. F., Hebert, R. L., Ledesert, B., & Noumowe, A. (2016). Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 111, 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>
- Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials*, 93, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
- Malik, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2021). Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. *Construction and Building Materials*, 270, 121398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121398>
- McNeil, K., & Kang, T. H. K. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. In *International Journal of Concrete Structures and Materials* (Vol. 7, Issue 1, pp. 61–69). Korea Concrete Institute. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- MSZ 4798. (2016). Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon.
- MSZ EN 933-2. (2020). Kőanyag-halmazok geometriai tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: A szemmegoszlás meghatározása. Vizsgálósziták, a szitanyílások névleges mérete.
- MSZ EN 1097-1. (2024). Kőanyag-halmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálatai. 1. rész: A kopásállóság meghatározása (mikro-Deval).
- MSZ EN 1097-2. (2020). Kőanyag-halmazok mechanikai és fizikai

- tulajdonságainak vizsgálata. 2. rész: Az aprózódással szembeni ellenállás meghatározása.
- MSZ EN 1936. (2007). Természetes építőkövek vizsgálati módszerei. Az anyagsűrűség és a testsűrűség, valamint a teljes és a nyílt porozitás meghatározása.
- MSZ EN 12350-5. (2009). A friss beton vizsgálata - Terülmérés.
- MSZ EN 12390-3. (2009). A megszilárdult beton vizsgálata – A próbatestek nyomószilárdsága.
- MSZ EN 12390-5. (2009). A megszilárdult beton vizsgálata - A próbatestek hajlító-húzószilárdság vizsgálata.
- Naus, D. J. (2006). The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures - a Literature Review. <https://doi.org/10.2172/974590>
- Pimienta, P., Alonso, M. C., Jansson McNamee, R., & Mindeguia, J.-C. (2017). Behaviour of high-performance concrete at high temperatures: some highlights. RILEM Technical Letters, 2, 45–52. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2017.53>
- Rahimi, M. Z., Zhao, R., Sadozai, S., Zhu, F., Ji, N., & Xu, L. (2023). Research on the influence of curing strategies on the compressive strength and hardening behaviour of concrete prepared with Ordinary Portland Cement. Case Studies in Construction Materials, 18, e02045. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02045>
- Rossi, P. (1991). Influence of cracking in the presence of free water on the mechanical behaviour of concrete. Magazine of Concrete Research, 43(154), 53–57. <https://doi.org/10.1680/mac.1991.43.154.53>
- Rossi, P., & Boulay, C. (1990). Influence of free water in concrete on the cracking process. Magazine of Concrete Research, 42(152), 143–146. <https://doi.org/10.1680/mac.1990.42.152.143>
- Sarhat, S. R., & Sherwood, Edward G. (2013). Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(11), 1721–1730. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000719](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000719)
- Sólyom, S., Balázs, G. L., Di Benedetti, M., Guadagnini, M., & Zappa, E. (2017). Bond strength of GFRP rebars in concrete at elevated temperature. In S. Keighley & M. Guadagnini (Eds.), Advanced Composites in Construction - ACIC 2017 (pp. 337–343).
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. In Resources, Conservation and Recycling (Vol. 171). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
- Wang, Y., Liu, F., Xu, L., & Zhao, H. (2019). Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials, 210, 540–547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.215>
- Waubke, N. V. (1973). Über einen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C Brandverhalten von Bauteilen [Dissertation]. TU Braunschweig.
- Zega, C. J., & Di Maio, A. A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. Construction and Building Materials, 23(5), 2047–2052. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.017>
- Zhang, B., & Bicanic, N. (2006). Fracture energy of high-performance concrete at high temperatures up to 450°C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold). Magazine of Concrete Research, 58(5), 277–288.
- Dr. Hlavička Viktor** (1987): okl. szerkezet-építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2014), okl. betontechnológus szakmérnök (2017), okl. tűzvédelmi szakmérnök (2017), egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, beton újrahaznosítás, rögzítések betonban, 3D beton nyomtatás. A *fib* Magyar Tagozat tagja.
- Dr. Lublőy Éva** (1976): okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2001), okl. betontechnológus szakmérnök (2011), okl. tűzvédelmi szakmérnök (2011), egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A *fib* Magyar Tagozat tagja.

Influence of Crushed Concrete Paving Blocks as Recycled Aggregate on the Mechanical Properties and Thermal Resistance of Concrete

Viktor Hlavička – Éva Lublőy

This study investigates the effect of recycled aggregate obtained from crushed concrete paving blocks on the mechanical properties and heat resistance of recycled concrete. Five mixes were prepared, four of which contained recycled aggregate at 20% and 50% replacement levels, examining both coarse fraction substitution and combined coarse and fine fraction replacement. Compressive strength, flexural tensile strength, and residual strength after thermal exposure were tested at temperatures between 150 °C and 600 °C. Results indicate that replacing the coarse fraction with recycled aggregate did not significantly reduce strength; in fact, a slight improvement was observed at 48% content. In contrast, incorporating fine fractions consistently weakened the concrete properties. Under thermal loading, a local strength increase occurred above 150 °C, followed by a marked decrease beyond 300 °C. Overall, the use of recycled aggregate can be beneficial if the proportion of fine fraction is minimized.



ACI-fib-RILEM Workshop
Call
September 28 to 30, 2026
Budapest, Hungary




Steel fiber reinforced concrete thin shell structure
 Oceanographic Park Restaurant. *City of Arts and Sciences*,
 Valencia (2002)
 Based on blueprint of Felix Candela, by: A. Domingo, C.
) Lázaro, P. Seina

The Workshop

Since 2010, the fib and ACI have been collaborating to strengthen ties between their technical communities. Their first focus area was Fibre Reinforced Concrete (FRC), where both organizations had active committee: **ACI Commissions 544, 239, 549** and **fib Task Group T4.1**. The collaboration aimed to harmonize design rules in this emerging field and to jointly develop future code specifications.

This collaboration has led to a series of successful international workshops:

- **FRC 2014, Montreal, Canada** – *From Design to Structural Applications*, Polytechnique Montreal. Proceedings published in **ACI SP-310** and **fib Bulletin 79** (Editors: Bruno Massicotte, J-Philippe Charron, G. Plizzari, Barzin Mobasher).
- **FRC 2018, Desenzano, Italy** – Proceedings published in **ACI SP-343** and **fib Bulletin 95** (Editors: Bruno Massicotte, Fausto Minelli, Barzin Mobasher, Giovanni Plizzari).
- **FRC 2023, Tempe, Arizona, USA** – Publications forthcoming (Editors: B. Massicotte, B. Mobasher, G. Plizzari).

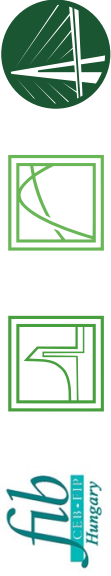
The foundation for these workshops dates back to **2004** with the first International Workshop on Advances in Fibre Reinforced Concrete held in **Bergamo, Italy**, organized by Giovanni Plizzari and Marco di Prisco during BEFIB 2004. This event, supported by ACI, focused on developing structural design methodologies for FRC (Editors: S. Ahmad, Marco di Prisco, Christian Meyer, Giovanni Plizzari, Surendra Shah).

- **Catania, Italy, 2007** – FRAMCOS 6 Workshop, chaired by Carpinteri, Ferro, and Giovanni Plizzari. Published in *Materials & Structures* (2009, Special Issue).
- **Budapest, Hungary, 1999** – Early conference on FRC, organized by György L. Balázs, bringing together international researchers on *Fibre Reinforced Concrete – from research to practice* http://fib.bme.hu/konyvek/szalerositesu_betonok.

These workshops have played a crucial role in advancing research, fostering international collaboration, and shaping the design practices for Fibre Reinforced Concrete.

Joint publication

The Workshop will conclude by a joint publication being part of the fib Series Proceedings (that is going to index by Scopus) as well as a Special Publication by ACI. We are also looking for a Summary of results for RILEM.

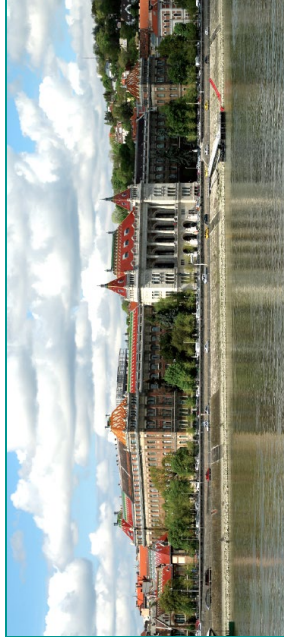


Library of the Budapest University of Technology and Economics

Venue – BME Budapest

Budapest University of Technology and Economics was founded in 1782 and it has been regarded as Hungary's number one technical higher education institution for more than 240 years.

Budapest, resting gracefully along the Danube, harmonizes centuries of history with a vibrant present. Landmarks like Buda Castle and Matthias Church echo tales of the past, while District VII's lively atmosphere embodies modern creativity in its eclectic bars and cafes. Art and culture thrive here, from the grandeur of the Hungarian State Opera House to the avant-garde exhibitions at the Ludwig Museum.



Topics

- Design specifications for applications
 - fib Model Code 2020
 - Standards and design specifications
 - Enhanced material behaviour and modelling
 - Enhanced structural behaviour and modelling in reinforced and in prestressed concrete members
- Structural applications
 - Buildings, Bridges, Foundations
 - Tunnels
 - Prefabrication
 - Concrete industrial floors
- Sustainability, Durability, Serviceability
 - Design aspects for sustainability and durability. Life Cycle Assessment.
 - Serviceability aspects: cracking, ~~fracture~~ crack pattern, spacing of cracks, crack widths, increase of crack width
- Design aspects for long term and extreme loads
 - Long term behaviour and modelling for shrinkage, creep, fatigue
 - FRC under fire, impact or blast loading.
- Retrofitting and strengthening of existing structures
- Fibres in new types of concretes and in 3D printed concretes

Sponsorship opportunities

We offer levels of sponsorship: Diamond (8,000 EUR), Gold (5,000 EUR), Silver (2,500 EUR), and Standard (1,000 EUR). Diamond and Gold sponsors receive exhibition space (larger for diamond). Diamond, Gold and Silver receive complimentary workshop registrations (4 for Diamond, 3 for Gold and 2 for Silver). All sponsors will have their logo displayed and name acknowledged during the opening and closing ceremonies, in the workshop proceedings, and on-site materials such as flyers and roll-ups. To become a sponsor, please provide your company details, and the sponsorship fee must be transferred prior to the workshop. Additionally a Platinum sponsorship level is also considered and prize is assigned on special topic proposed by the Sponsor.

Contact information

Official website:

<https://frcworkshop2026.bme.hu>

Műgyeitem 3, Budapest, H-1111 Hungary

frcworkshop2026@emk.bme.hu



Organizer

Budapest University of Technology and Economics (BME),
Faculty of Civil Engineering

Supported by:

ACI - <https://www.concrete.org>

fib - www.fib-international.org

RILEM - <https://www.rilem.net>

Dates

December 15, 2025 Submission of abstracts

January 10, 2026 Extended Abstract deadline

January 15, 2026 Acceptance of abstracts

March 31, 2026 Full paper submission

May 31, 2026 Full paper review

July 1, 2026 Full paper acceptance

Registration fee

Early / regular 600 / 700 EUR

Student / PhD student 300 EUR

Banquet 100 EUR

Early bird ends July 15, 2026

Registration fee includes: Welcome cocktail, Coffee breaks, Lunches and Pre-Proceedings. It is required for every presentation to have a separate registration.

Organizing Committee

Sándor Sólyom (HU),	Chairman,	BME
Kálmán Koris (HU),	Co-Chairman,	BME
György L. Balázs (HU),	Co-Chairman,	BME
Ahmed Seyam (UK) Adrienn Für-Kovács (HU)	Jorge Luis Campoverde (HU)	
András Bíró (HU)	Tibor Mihucz (HU)	Katalin Kopecskó (HU)
Bálint Somlai (HU)	Csaba Miklós (HU)	Marie Raymond (CH)
Corinne Bottollier Depois (CH),	Romy Ramiro Almeida Vasquez (HU)	
Hatem Affez (HU) László Polgár (HU)	László Sipos (HU)	Szabolcs Szinvai (HU)

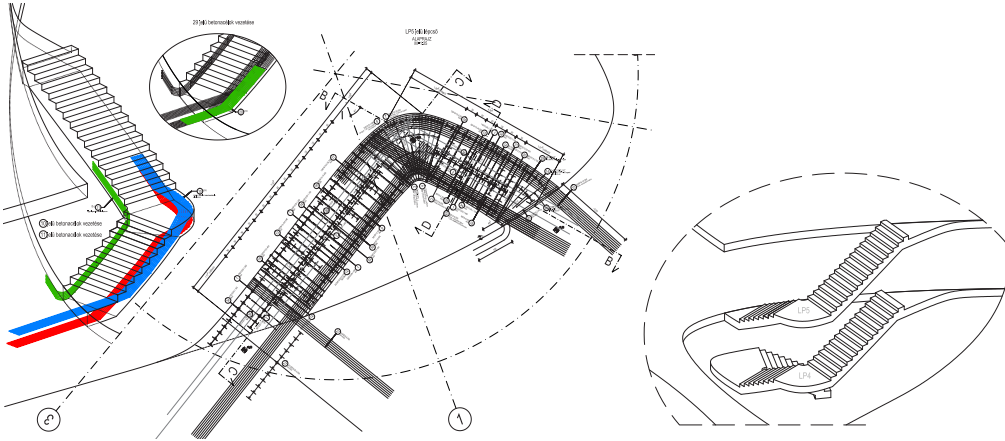
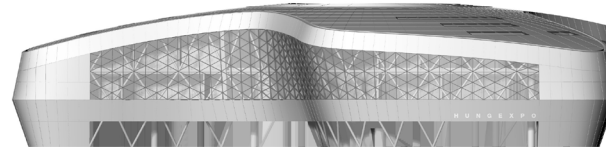
Scientific Committee

György L. Balázs (HU),	Chairman,	BME
Sándor Sólyom (HU),	Co-Chairman,	BME
Kálmán Koris (HU),	Co-Chairman,	BME

Advisory Board members of the Scientific Committee

Marco di Prisco (IT), Politecnico di Milano		
Giovanni Pilzari (IT), Università di Brescia		
Bruno Massicotte (CA), Polytechnique Montréal		
Jean-Philippe Charron (CA), Polytechnique Montréal		
Fausto Minelli (IT), Università di Brescia		
Barzán Mobasher (US), Arizona State Univ		
Members		
Alejandro Perez Caldentey (ES)		Lin Wan-Wendner (BE)
Ana Elisabete P.G.A. Jacintho (BR)		Lucie Vandewalle (BE)
Antoine Naaman (US)		Luis Segura (UY)
Atef Daoud (TN)		Matteo Colombo (IT)
Avraham Dancygler (IL)		Naser Alimrani (CA)
Billy Boshoff (ZA)		Nemy Banthia (CA)
Brecht Vandevivere (BE)		Nicola Buratti (IT)
Bryan Barragan (FR)		Nicola Tosić (ES)
Christian U. Grosse (DE)		Niifer Özyurt (TR)
David Fernandez-Ordóñez (CH)		Norbert Randl (AT)
Dirk Schlicke (AT)		Oliver Fenyvesi (HU)
Ekkehard Fehling (DE)		Paolo Martinelli (IT)
Elena Vidal Sarmiento (BE)		Pedro Serna Ros (ES)
Éva Lublőy (HU)		Peter Mark (DE)
Filippo Medeghini (DE)		Péter Schaul (HU)
Frank Dehn (DE)		Pierre Rossi (FR)
Gabriele David Bocchino (IT)		Raul Luis Zerbino (AR)
Gábor Csorba (HU)		Ralf Winterberg (DE)
Gonzalo Ruiz López (ES)		Ravindra Gettu (IN)
Gustavo Parra Montesinos (US)		Robert Németh (HU)
György Farkas (HU)		Roman Wan-Wendner (BE)
Idiko Merta (AT)		Rugier Vrijdaghs (BE)
Imre Kovács (HU)		Salem G. Nehme (HU)
Ingrid Lande (NO)		Sébastien Wolf (LU)
István Sajtos (HU)		Sheriff Abdel Aziz Yehia (AE)
Ján Vorel (CZ)		Silvia Lentile (FR)
Jean Michel Torrenti (FR)		Stefan Bernard (AU)
Joaquim Barros (PT)		Tamás Kovács (HU)
Juan Navarro Gregori (ES)		Tamon Ueda (JP)
Hans Beushausen (ZA)		Terje Kanstad (NO)
Károly Péter Juhász (HU)		Todd Clarke (AU)
Klaus Holschemacher (DE)		Tor Arne Martius-Hammer (NO)
Liberato Ferrara (IT)		Viktor Gribniak (LT)
		Viktor Hlavicka (HU)
		Vincent Oettel (DE)
		Yuri Karinski (IL)
		Zoltán Orbán (HU)

HYDRA STAT





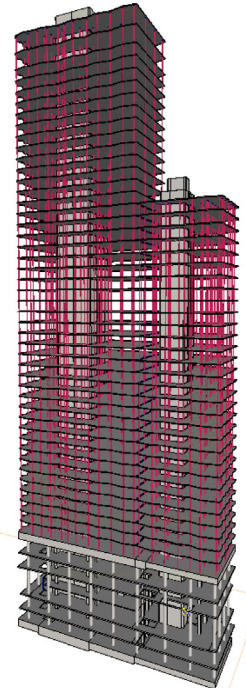
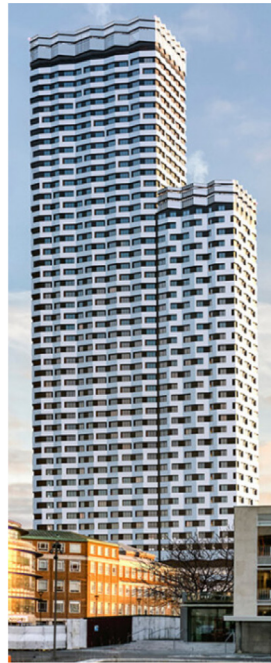
AXISVM

TELJESKÖRŰ VASBETONTERVEZÉS

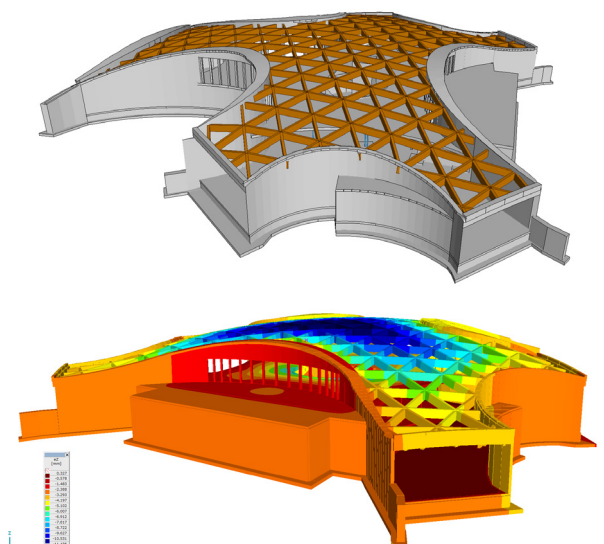
ÚJDONSÁG!

Építési állapotok vizsgálata

- ▶ Építési folyamatok modellezése
- ▶ Bontási folyamatok modellezése
- ▶ Részben lebontott és megerősített szerkezet vizsgálata
- ▶ Szerkezeti megerősítések és kiváltások vizsgálata
- ▶ Szerkezeti károsodás elemzése
- ▶ Hídbetolás folyamatának modellezése
- ▶ Szerkezet robusztusságának elemzése



Collage Road, London (Egyesült Királyság), Barrett Mahony Consulting Engineers



Musée du Saint-Bernard, Martigny (Svájc), ARX (Pini Group) SA Sion