



A szálkóktélok hatása a beton duktilitására

Szerző:

Tóth Mária építészmérnök hallgató

Konzulensek:

Dr. Pluzsik Anikó egyetemi adjunktus, BME Építészmérnöki Kar, Szilárdságtani és
Tartószerkezeti Tanszék

Juhász Károly Péter tanársegéd, laborvezető, BME Építészmérnöki Kar, Szilárdságtani és
Tartószerkezeti Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Tartalom

1.	Bevezetés	3
2.	Problémafelvetés	5
3.	Laborkísérletek	6
4.	Mechanikai modell.....	12
	Törés előtti állapot	13
	Törés utáni állapot	13
5.	Konklúzió.....	19
6.	Továbbfejlesztési lehetőségek	20
7.	Összefoglalás	21
8.	Köszönetnyilvánítás	22
9.	Irodalomjegyzék	22
10.	Mellékletek	23
	1. melléklet – program leírás.....	23
	2. melléklet – F-CMOD görbék	25
	3. melléklet – beton összetétele.....	30
	4. melléklet – szálmegoszlás a keresztmetszet mentén	31

1. Bevezetés

A szálerősítésű beton egy kompozit anyag, amely betonból, mint a szálak ágyazó anyagából (betonmátrix), és a benne egyenletesen elkevert, véletlenszerűen elhelyezkedő szálakból tevődik össze. A szálerősítésű betonokat korábban elsősorban ipari padlókhöz alkalmazták, újabban egyre gyakrabban használják tartószerkezeti elemeknél is a vasalás kiegészítésére, esetenként csökkentésére vagy elhagyására (előregyártott beton elemek, vasúti ágyazat helyett szálerősítésű beton lemezágyazat, lemezalap, pincefal, utak és járdák, medencék). A beton duktilis viselkedésének javításán túl a további előnye a repedés tágasságának csökkentése, amely leginkább a hozzáadott szálak típusától és mennyiségétől függ, nagyban hozzájárulva a kész szerkezet élettartamának növekedéséhez. [2]

Hazánkban is egyre elfogadottabbá válik a szintetikus szálerősítésű betonok alkalmazása, habár a szintetikus mikro és makro szálak közötti alapvető különbségeket gyakran még a szakemberek sem ismerik. A különbség azonban jelentős, mind a méretezés, mind a felhasználás tekintetében. A szintetikus szálakat a brit BS EN 14889 [1] szabvány két osztályba sorolja: mikro és makro szálak, a mikro szálakon belül pedig újabb két csoportba: mono szálak és fibrillált szálak (1. ábra). A szabvány egyértelműen megjelöli, hogy csak a makro szálak méretezhetőek statikailag:

Classification of fibres Polymer fibres shall be characterised by the manufacturer in accordance with their physical form.

Class Ia: Micro fibres: < 0,30 mm in diameter; Mono-filamented

Class Ib: Micro fibres: < 0,30 mm in diameter; Fibrillated

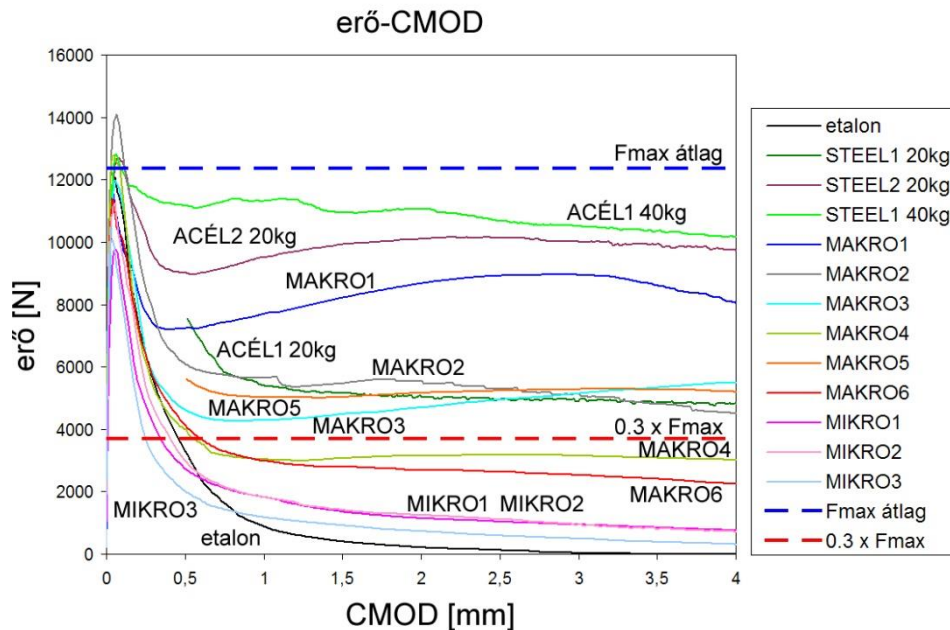
Class II: Macro fibres: > 0,30 mm in diameter

NOTE Class II fibres are generally used where an increase in residual flexural strength is required.



1. ábra: Fotó – Mikro és makro szálak

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék Czákó Adolf Laboratóriumában készítették egy gerenda teszt sorozatot, ahol a hazai forgalomban levő szintetikus szálak hatását vizsgálták a nemzetközi irányelvben ajánlott módon [4]. A kutatás „A Nagy Törés” elnevezést kapta, a kutatási eredmények letölthetőek a tanszék honlapjáról: www.szt.bme.hu/labor.



2. ábra: "A Nagy Törés" erő-CMOD eredményei [4]

A gerendákat úgynevezett három pontos (felezőpontos) hajlítási teszttel vizsgálták, majd kimérték az erő-repedésmegnyílás értékeket. A repedésmegnyílás (CMOD: Crack Mouth Opening Displacement) a bemetszett gerenda alsó felületén a bemetszés megnyílásának nagysága, melyet egy speciális eszközzel mértek ki a törés folyamata alatt egészen 4 mm-es repedés megnyílásig. Az összesített diagramon a különböző gyártmányú makro és mikro szintetikus szálerősítésű gerendák átlagértéke szerepel, továbbá összehasonlításképp két típusú acél szálerősítésű, illetve szálerősítés nélküli betongerenda is (2. ábra). A diagramról leolvasható, hogy a szálak nem növelik jelentősen a repesztő erőt: repedés előtt a gerenda úgy viselkedik, mint a normál beton. Viszont repedés után nem jellemző rá a rideg tönkremenetel, alapvetően megváltozik a viselkedése, az anyagnak megnő a duktilitása. Ez a duktilitás a görbe alatti területtel szemléltethető legjobban, és láthatóan nagymértékben változik a szál típusától függően. A mikro szálak a beton mechanikai jellemzőit nem befolyásolják jelentősen, a duktilitásra gyakorolt hatása gyakorlatilag alig érzékelhető, ez összhangban van a brit szabvány állításával.

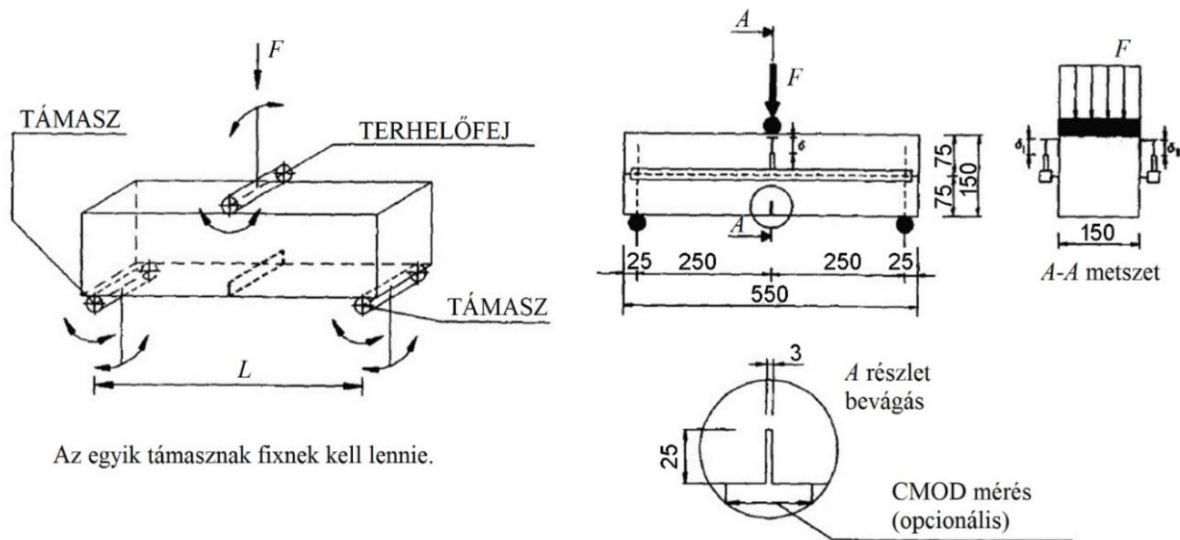
2. Problémafelvetés

A korábbi kutatások alapján a mikro szálak hatása a duktilitásra önmagában jelentéktelen, míg a makro szálaknak a beton repedése után van jelentős szerepük a duktilitás növelésében. Felmerül azonban a kérdés, hogy ha a két száltípust együtt alkalmazzuk az hogyan hat az anyag duktilitására? A mikro szálak elenyésző hatása a repedés után pusztán hozzáadódik a makro szálak jelentős duktilitás-növekményéhez, vagy a szálkoktél (mikro és makro szálak keveréke) máshogy viselkedik, és a mikro szálak betonmátrixra gyakorolt hatása kihat a makro szálak viselkedésére is? Illetve, ha van különleges hatása a szálkoktélnek, azt mi okozza? Feltételezhetően a mikroszálak növelik a beton hajlító-húzószilárdságát, azaz a betonmátrix szilárdságát. Ez hatással lehet a makroszálak duktilitás növelésére is? A mikroszálak ugyanakkor gátolják a beton szilárdulása közben kialakuló mikrorepedéseket is, mely hatással lehet a makroszálak és a betonmátrix közötti kapcsolatra is, növelve az együttdolgozást illetve a szál kihúzó ellenállását, ami végső soron ugyancsak a duktilitás növekedését okozhatja.

Ezzel a kérdéskörrel a Riga Technical University [6] cikke már foglalkozott. Nagyszilárdságú betonnal végezve a kísérletet arra az eredményre jutottak, hogy a makro szálak a duktilitást, míg a mikro szálak kis mértékben a húzószilárdságot növelik. Ez az eredmény azonban használható számítási modell hiányában és a kísérleti eredmények nagy szórása miatt csupán sejtésnek tekinthető.

3. Laborkísérletek

A szálkocktélók hatását három pontos (felezőpontos) hajlítási teszttel vizsgáltuk. A vizsgálatot a RILEM TC 162-TDF [8] irányelvben megjelent ajánlások alapján végeztük el (3. ábra).



3. ábra: RILEM TC 162-TDF által javasolt hajlítási kísérlet

A kísérletben egy 500 mm támaszközű kéttámaszú, közepén alul 25 mm mély és 2 mm széles bevágással gyengített 150x150 mm keresztmetszetű gerendát terheltünk elmozdulás vezérelt módon 0,2 mm/perc sebességgel. A mért értékek az erő, középponti lehajlás és a repedésmegnyílás (CMOD) volt. A kísérletet a CMOD 4 mm-es értékéig folytattuk. A gerendák és a kísérletsorozat a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékének Czakó Adolf Laboratóriumában készültek. Az terhelő berendezés ZWICK/ROELL Z150 típusú univerzális anyagvizsgáló gép volt.



4. ábra: Fotó – ZWICK/ROELL Z150 univerzális anyagvizsgáló gép

A kísérlethez tizenöt gerendát készítettünk, melyből három szálerősítés nélküli C30/37-16-F3 normál betonból; négy gerenda 5kg/m³ adagolású SHOGUN makro szállal erősített betonból; négy gerenda 1,5 kg/m³ adagolású MONOGURU PP19mm típusú mikro szállal erősített betonból; és négy gerenda 5kg/m³ adagolású SHOGUN makro- és 1,5 kg/m³ adagolású MONOGURU PP19mm típusú mikro szállal erősített betonból készült (1. táblázat). A beton összetétele mind a négy típusú gerendánál azonos volt (3. melléklet).



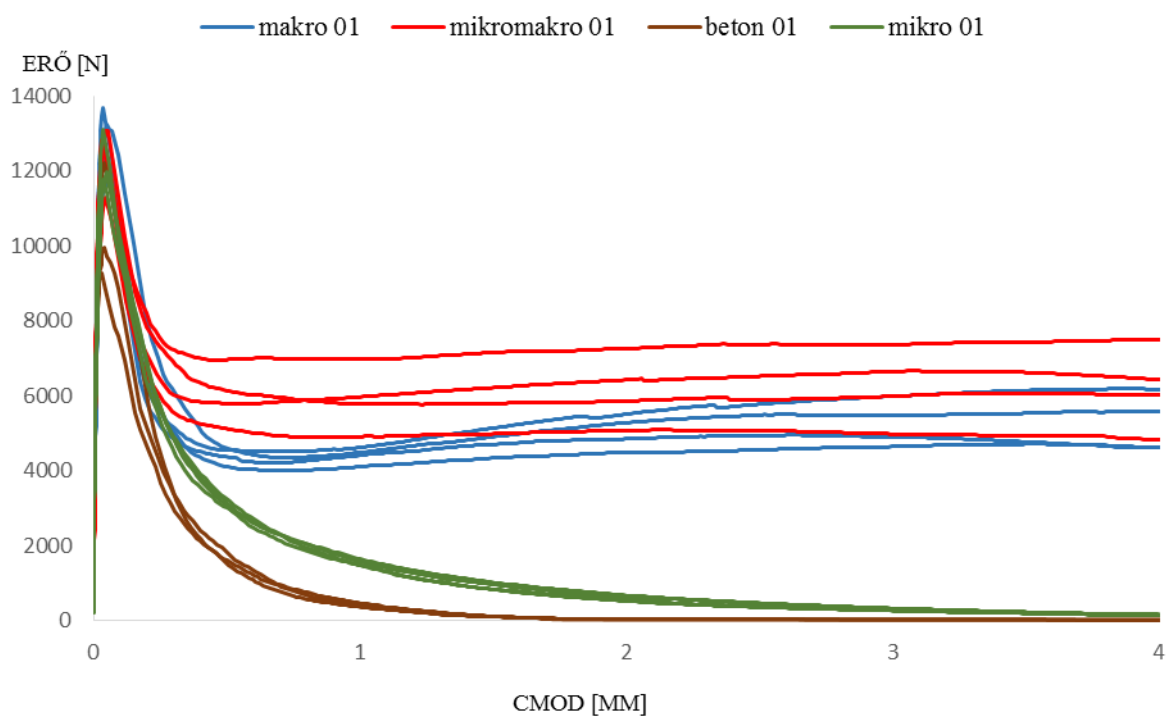
5. ábra: Fotó – A keverés

1. táblázat

Kutatási mátrix		
Gerenda jele	Beton szilárdsági osztálya	Szál típusa és adagolása
beton-1-2-3	C30/37	-
mikro-1-2-3-4	C30/37	MONOGURU PP19 mikro 1,5 kg/m ³
makro-1-2-3-4	C30/37	SHOGUN makro 5 kg/m ³
mikromakro-1-2-3-4	C30/37	MONOGURU PP19 mikro 1,5 kg/m ³ + SHOGUN makro 5 kg/m ³

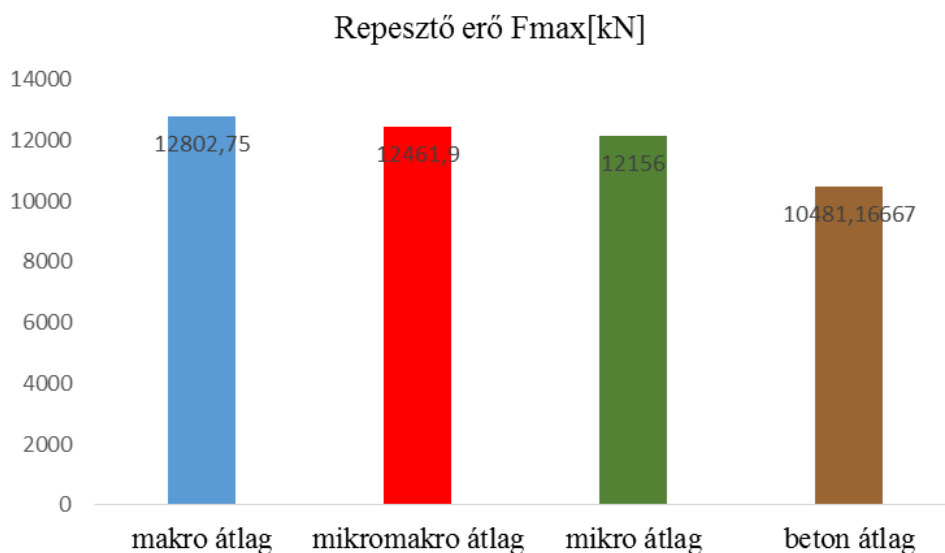
2. táblázat: száltípusok jellemzői

SHOGUN makro szál	
típusa:	felületén dombornyomott polipropilén makro szál
keresztmetszete:	ovális
átmérője:	1,3 x 0,5 mm
hossza:	48 mm
fajsúlya:	1,66 gramm / 100 db
adagolása:	5 kg/ m ³
MONOGURU PP19 mikro szál	
típusa:	mono
keresztmetszete:	kör
hossza:	10 mm
adagolása:	1,5 kg/m ³



6. ábra: Kísérlet erő-CMOD eredményei

A kísérleti görbéken (6. ábra) a törési eredmények erő-CMOD diagramjait láthatjuk. A normál beton illetve a mikro szásas gerendák jól láthatóan elkülönülnek, a kísérlet igazolta, hogy a makro szál nélküli gerendák duktilitása elhanyagolható, viszont a mikro szál a normál betonhoz képest növelte a repesztő erőt.



7. ábra: Repesztő erők

A csak makro illetve szálkoktélos gerendáknál nagyobb a szórás. Az eredmények (6. ábra) alapján sejthető, hogy a szálkoktélos mátrix duktilitása jobb, mint a makro szállal erősítetté, ám biztosat nem lehet mondani, hiszen van olyan szálkoktélos gerenda, amelyik alulteljesítette a makro szálal gerendát.

A nagy szórás oka a makro szálak eloszlásában keresendő: amelyik gerendánál alulra került több szál, ott jóval nagyobb igénybevételt bírt ki a gerenda (3. táblázat). Ezt úgy vizsgáltuk meg, hogy az eltört gerendák mindkét felén megszámoztuk a szálakat, külön a szakadtakat, és külön a kihúzódottakat. A szám adatok alapján kitűnt, hogy a szálak döntően nem szakadással mennek tönkre, hanem kihúzódnak.

3. táblázat: szálmegoszlás a keresztmetszet mentén

	kihúzódott szálak	szakadt szálak	összes szál	szakadt és kihúzódott szálak aránya
mikromakro1	60	23,5	83,5	0,39
mikromakro2	44	13	57	0,30
mikromakro3	69	16,5	85,5	0,24
mikromakro4	78	32	110	0,41
átlag:	62,8	21,3	84,0	0,34
makro1	56	21,5	77,5	0,38
makro2	103	12	115	0,12
makro3	64	18	82	0,28
makro4	69	22	91	0,32
átlag:	73,0	18,4	91,4	0,28

A szálak elhelyezkedésének figyelembe vételére definiáltunk egy keresztmetszetre jellemző értéket, a *szálnyomatékot* [3], amelyet a következőképpen számoltunk ki: a gerendákat 6 sávra osztottuk (a 6. a bevágás), és minden sávban megszámláltuk a szálakat. A szálakat a sávok közepére feltételeztük, ez alapján a szálnyomaték a következő képlettel számítható:

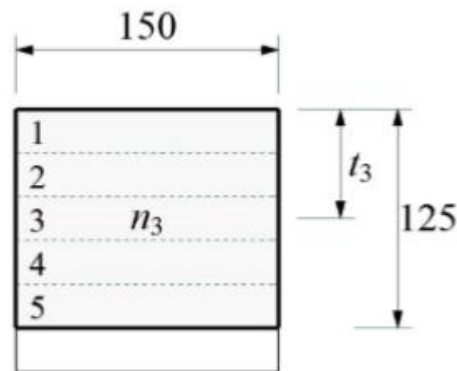
$$S_f = \sum_{i=1}^5 t_i \times n_i \quad (1)$$

ahol:

S_f : szálnyomaték, mm

t_i : szálmézők középpontjának távolsága a semleges tengelytől, közelítésképp a gerenda szélső szálától, mm (8. ábra)

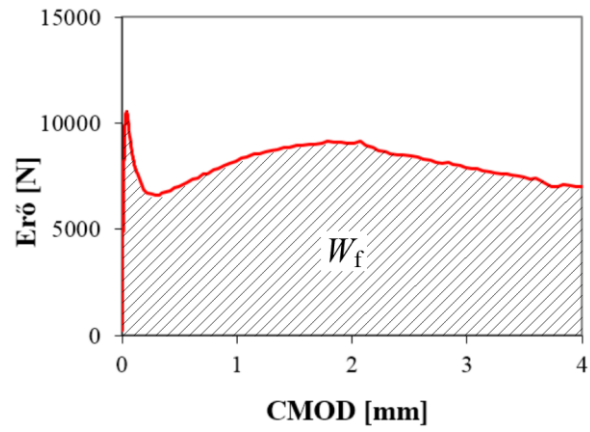
n_i : szálak darabszáma az aktuális mezőben



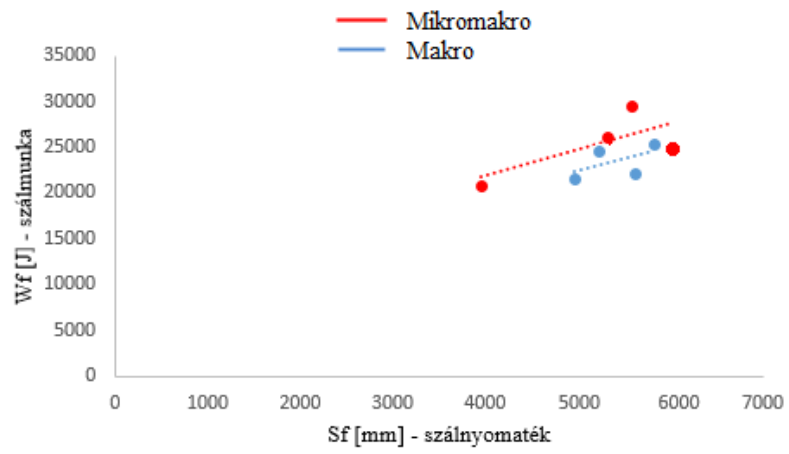
8. ábra: Az eltört keresztmetszeten értelmezett sávok és távolságok

Az így kapott szálnyomatékok pusztán a szálak keresztmetszet menti elhelyezkedésétől függenek.

A szálak által okozott duktilitás növekedés számszerűsítéséhez definiáltunk egy másik, gerendára jellemző értéket, a szálmunkát (W_f), ami a görbe alatti terület (9. ábra) [3]. A szálmunka és szálnyomaték összefüggések pedig a 10. ábrán láthatóak. A diagramon jól látszik, hogy a csak makro szállal erősített beton szálmunkája kisebb, mint a szálkotélos betoné. Azt viszont nem tudnánk megmondani, hogy mennyivel tud többet a szálkotélos gerenda a makro szálashoz képest. Így ahelyett, hogy a mérések alapján – esetleg téves – elméleteket gyártottunk volna, megpróbáltuk modellezni a jelenséget.



9. ábra: Szálmunka értelmezése [3]



10. ábra: Szálmunka-szálnyomaték összefüggés

4. Mechanikai modell

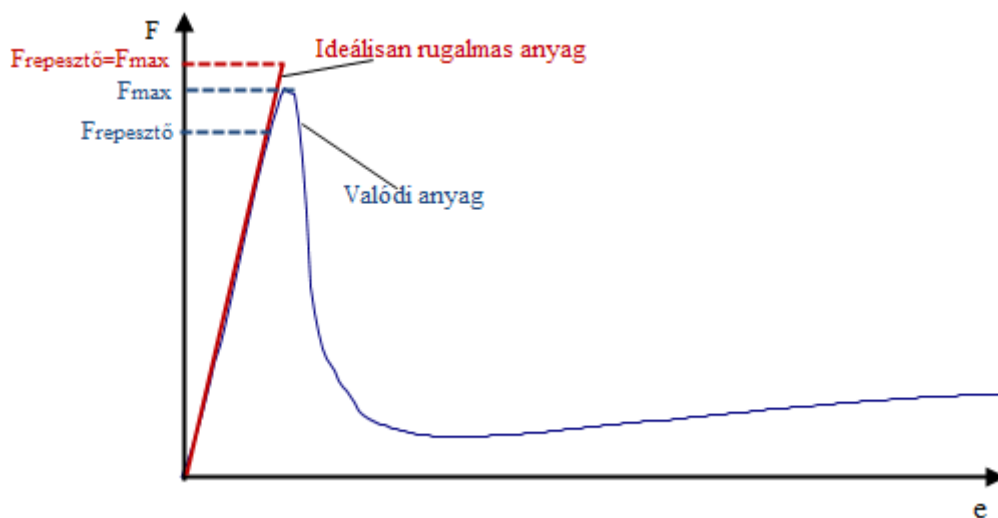
A szakirodalomban található két modell nem igazolja a sejtésünket, ezért helyette olyan modellt használtunk a szálerősítésű betonok számítására, ami az eddigi elkent (smeared) és diszkrét (VEM és DEM) modellek között félúton van. A modell figyelembe veszi a szálak valós eloszlását, ami a gerenda törése után lett meghatározva az eltört keresztmetszeten.

A kísérleti eredményekből számítottuk ki a különböző betonmátrixok hajlító-húzószilárdságát a következő képlettel:

$$f_t = \frac{M}{I} \times z = \frac{\frac{F \times l}{4}}{\frac{150 \times 125^3}{12}} \times \frac{125}{2} \quad (2)$$

ahol:

F : a maximális erő (ez közelítés, a valóságban a gerenda a maximális erő elérése előtt bereped. A repedés után nem lesz többé érvényes a Hook törvény, ezért nem lesz tovább lineáris az erő-elmozdulás ábra (11. ábra), létrejön egy regressziós szakasz, de még tud tovább terhet viselni. Így a maximális erő nagyobb a repesztő erőnél, de ezt most elhanyagoljuk.)



11. ábra: Erő-elmozdulás ábra

l : a gerenda hossza, és

f_t : a beton hajlító-húzószilárdságának az átlagértéke a 4. táblázat alapján

4. táblázat: A beton hajlító-húzószilárdságának átlagértéke

	f_t [N/mm ²]
beton	3,35
mikro szállal erősített beton	3,89
makro szállal erősített beton	4,095
mikro és makro szállal erősített beton	3,98

Ebből látszik, hogy a mikro szál a beton szilárdságát valamivel növeli, viszont erről csak a számítási modellünk pontosításával tudnánk többet mondani.

A modellel történő számításnál a kísérletből mindössze ezeket az adatokat emeltük ki (beton húzószilárdsága, száeloszlás), valamint a kísérleti görbe alatti terület nagyságát (szálmunka), a méreteken kívül (gerenda hossza, keresztmetszeti adatok).

Törés előtti állapot

A törés előtti állapot számítását a vasbetonnál alkalmazott módszerrel [5] – a szálak figyelembe vétele nélkül – végeztük el, mivel a szálak lényegében kihúzóással viselik a terhet, tehát csak a repedés után fognak dolgozni (lásd.: szakirodalom). Így ezzel a közelítéssel nem követünk el hibát: κ -t (a görbületet) növeltük 0-ról egészen addig, amíg a feszültség el nem érte a fent kiszámolt beton húzószilárdságot (tehát a keresztmetszet berepedéséig). κ -ból számoltuk a nyomatékot:

$$M = \frac{\kappa \times E_c \times b \times h^3}{12} \quad (3)$$

ahol:

M : a keresztmetszetet terhelő nyomaték, Nmm

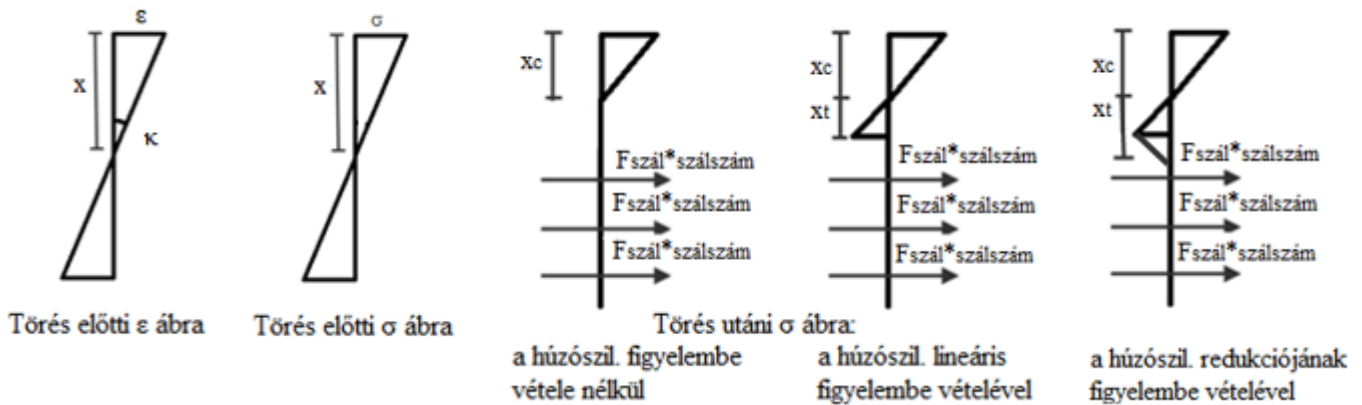
E_c : a beton rugalmassági modulusa (30 000 N)

b : a gerenda szélessége (150 mm)

h : a gerenda bevágás nélküli magassága (125 mm)

Törés utáni állapot

Törés után első közelítésként a számítást a beton húzószilárdságának figyelembe vétele nélkül végeztük el, majd később tovább finomítottuk a modellt a húzott betonzóna lineáris eloszlással való közelítésével, végül pontosítottuk a beton húzószilárdság redukciójának figyelembe vételével (12. ábra).



12. ábra – σ ábrák

A keresztmetszetet a szálak sávonkénti figyelembe vételével modelleztük. Ebben az esetben a nyomott illetve húzott betonzónába eső makro szálakat nem vettük számításba, a berepedt zónába eső szálakat pedig a sávonkénti szálszámok és egy fiktív szálerő szorzataként állítottuk elő. Ekkor a nyomott betonzónát a vetületi egyenletből számíthatjuk ki:

$$\frac{b \times x_c^2 \times \kappa \times E_c}{2} = \frac{b \times x_t \times f_t}{2} + F_{szál} \times szálszám \quad (4)$$

ahol

x_t : a húzott betonzóna magassága

x_c : a nyomott betonzóna magassága

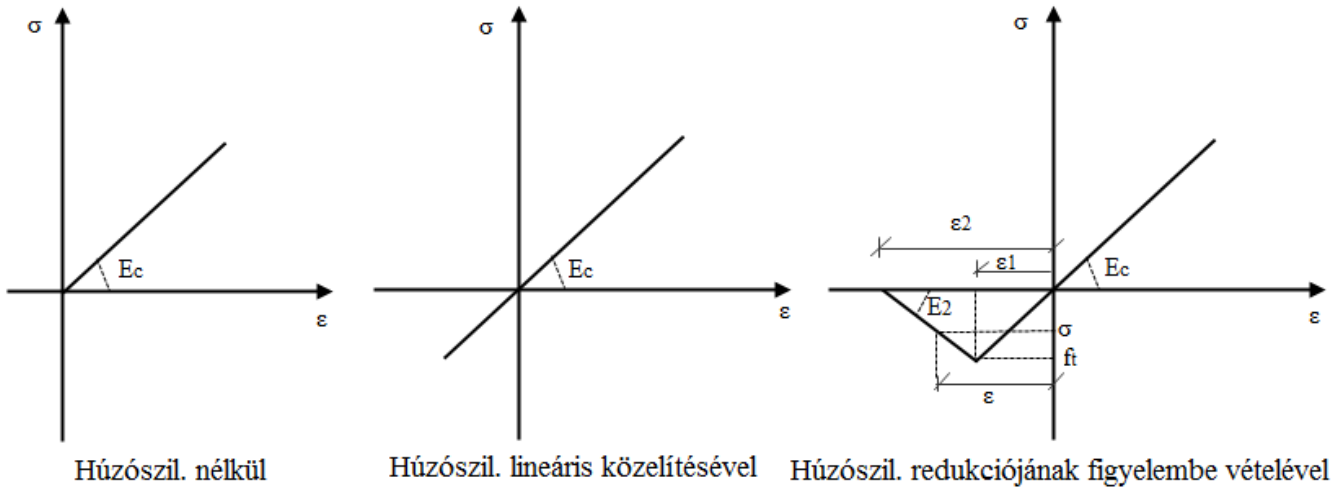
$F_{szál}$ -at konstansnak feltételezzük. Nem azért mert képlékeny, hanem mert ez a kihúzódáshoz tartozó erő. Az eltört keresztmetszeteket vizsgálva lehet látni, hogy a szálak jellemzően nem szakadással mennek tönkre, hanem kihúzódnak. Ezt a feltételezést az A Nagy Törés [4] eredményei is alátámasztják.

Ebből x_c -t kifejezve:

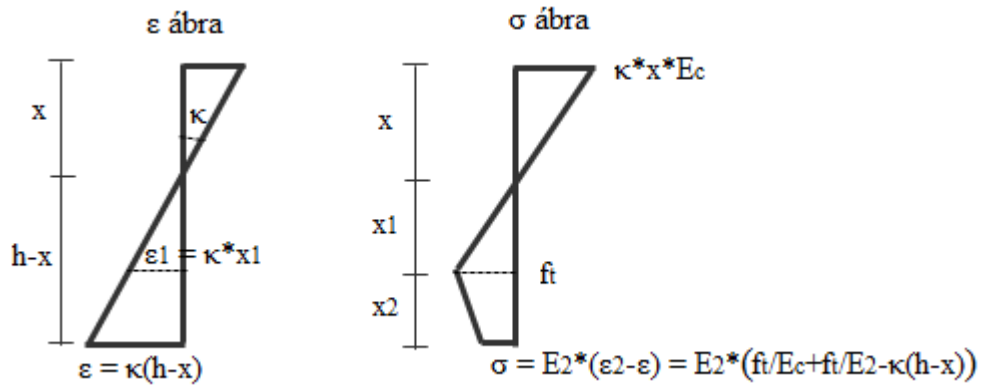
$$x_c = \sqrt{\frac{2 \times F_{szál} \times szálszám + b \times x_t \times f_t}{b \times E_c \times \kappa}} \quad (5)$$

amelyben figyelembe kell vennünk, hogy x_c függvényében hány szálsáv dolgozik. Ennek számítására külön programok írtunk Sage programnyelven (1. melléklet).

A húzószilárdság redukciójának figyelembe vételekor E_2 (12. ábra) ismeretlen adat, amit iterálással közelítettünk a következőképpen: a programban 0-nak feltételezve a szálerőt (így kiküszöbölve a szálak hatását) közelítettük a normál beton törésekor kirajzolt kísérleti görbét, ezzel meghatározva E_2 -t. Ezután a húzott betonzóna ismertté vált és a nyomott betonzónát a vetületi egyenletekből tudtuk számolni (13. ábra).



13. ábra – σ - ϵ ábrák



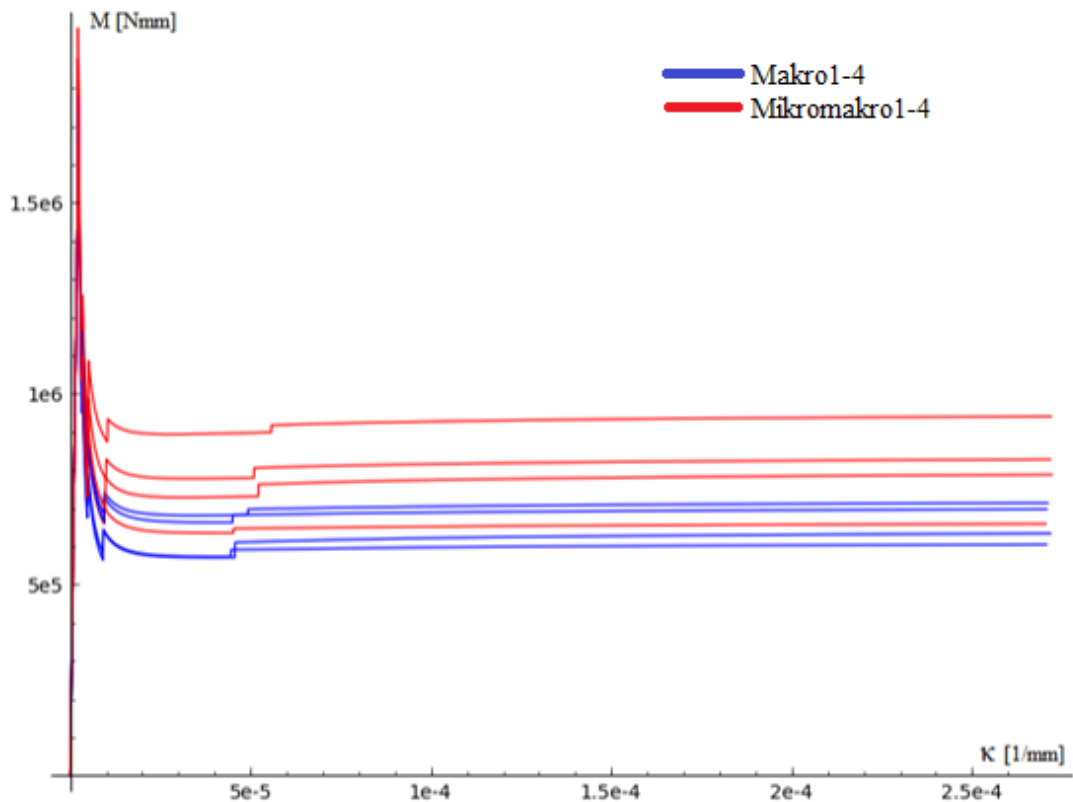
14. ábra - Húzószilárdság redukciója: ϵ , σ ábra

A nyomaték számítása:

$$M = \frac{b \times x_c^2 \times \kappa \times E_c}{2} \times \frac{x_c}{3} - \frac{b \times x_t \times f_t}{2} \times \left(x_c + \frac{2 \times x_t}{3} \right) - F_{szál} \times szálszám \times száltávolságok \quad (6)$$

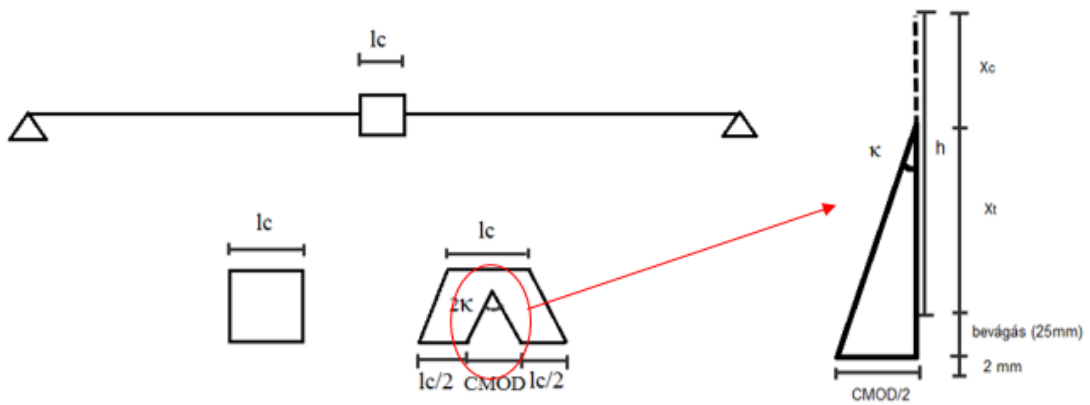
melynél szintén programot írtunk a szálak viselkedéséhez.

Ezekből a számításokból létrejöttek az M - κ ábrák (15. ábra):



15. ábra - M- κ görbe

A görbületből (κ) számoltuk ki a repedésmegnyílást (CMOD). Ezt hagyományosan úgy tudnánk levezetni, hogy a tartó κ -ábrájának integrálásával megkapnánk a tartó szögelfordulását, (majd azt integrálva kapnánk meg a lehajlást), és a szögelfordulásból számítanánk ki a repedésmegnyílást. Ez azonban csak abban az esetben működik, amikor a tartó teljes hosszán alakulnak ki repedések. Esetünkben viszont a tartó középső keresztmetszetének alsó hatoda be volt vágva, így egy központi repedés keletkezett. Mivel a repedés után a teherbírás jeletősen visszaesik, ezért a tartó többi keresztmetszete rugalmas marad, csak a középső keresztmetszet éri el a képlékeny állapotot: képlékeny csukló keletkezik (15. ábra). Ekkor a rugalmas szakaszt elhanyagoljuk, és a repedésmegnyílást a képlékeny keresztmetszet karakterisztikus hosszából (l_c) számíthatjuk a Bazant modell alapján:



16. ábra – CMOD számítása

$$CMOD = x_w \times \kappa \times l_c$$

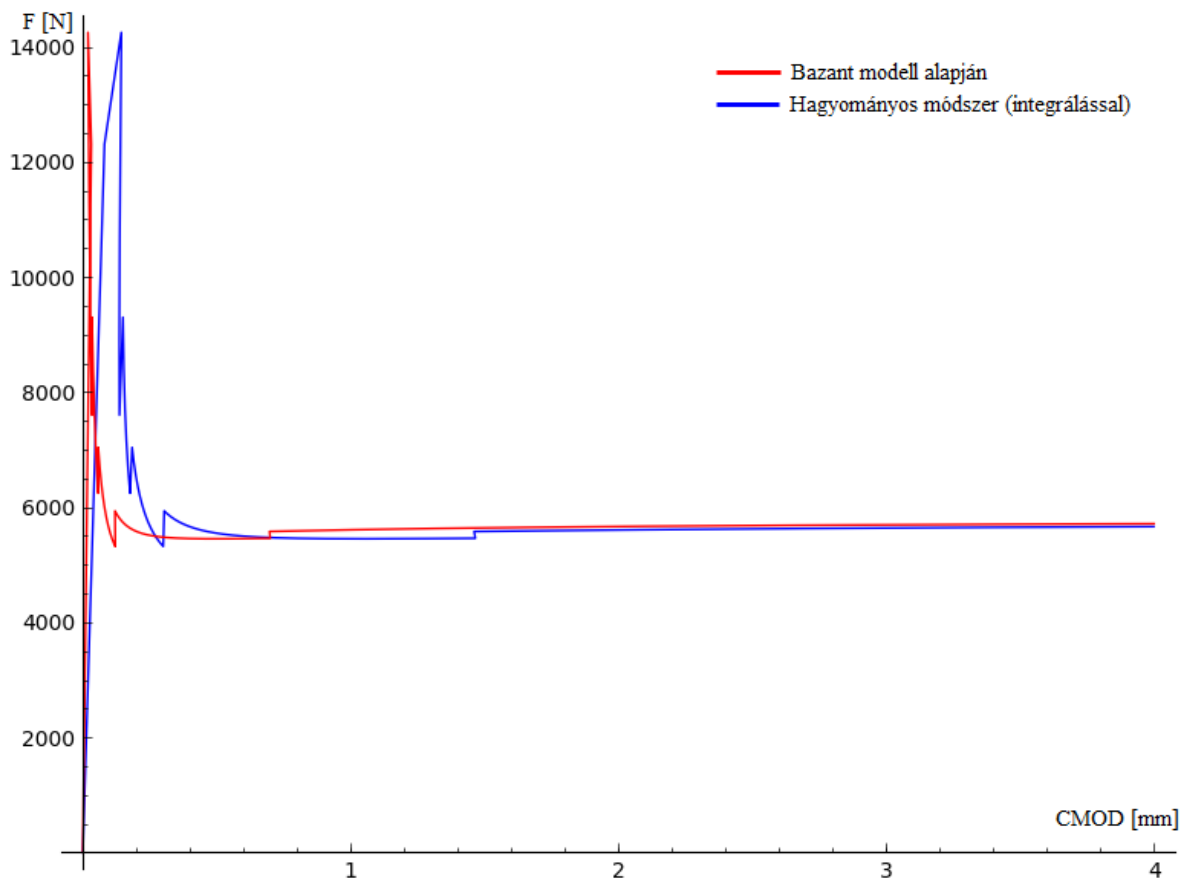
ahol l_c a karakterisztikus hossz, és

$x_w = h - x_c + 25 + 2$ mm, a CMOD mérő eszköz helye a kísérletben.

Az erőt pedig az:

$$F = \frac{4 \times M}{l} \quad (7)$$

képlettel számoltuk át. A hagyományos megközelítéssel, illetve a Bazant modell alapján számolt görbe lényegi különbséget nem eredményezett (17. ábra).



17. ábra - Két féle CMOD számítás

Az így létrehozott numerikus eredményekből nyert görbéknek (ahol $F_{szál}$ még ismeretlen, inverz analízis során meghatározott érték) kiszámoltuk a szálmunkáit (ahogy a kísérleti görbéknek is), majd a számítás bemenő adatai között szereplő fiktív $F_{szál}$ erőt minden egyes makro szál és szálkóttélos gerendánál a kísérleti és számított görbe szálmunkájának egyenlővé tételével nyertük ki. Ezek alapján az alábbi értékeket kaptuk:

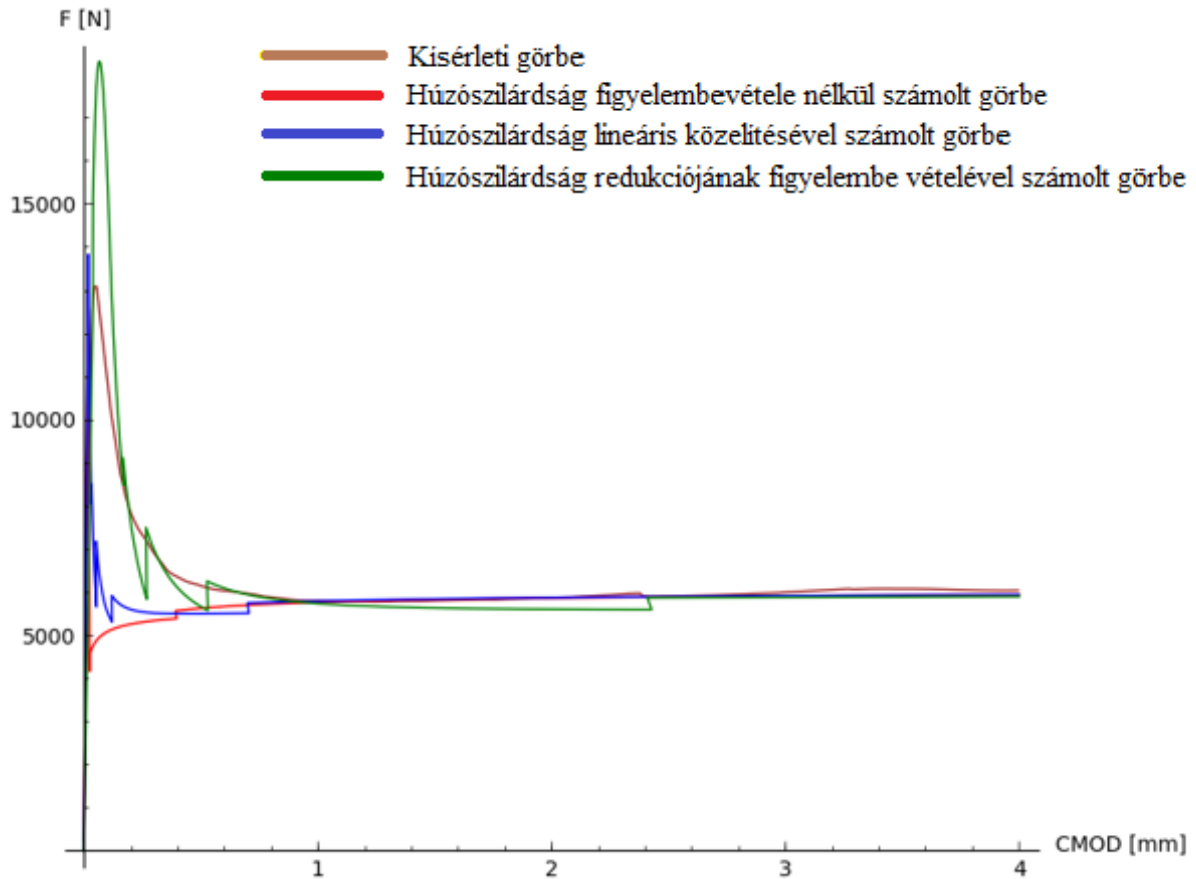
5. táblázat

	$F_{szál}$ [N] húzószilárdság nélkül	$F_{szál}$ [N] húzószilárdság lineáris közelítésével	$F_{szál}$ [N] húzószilárdság redukciójának figyelembe vételével	
makro1	138	137	107	
makro2	119	118	105	
makro3	127	125	112	átlag:
makro4	128	127	117	121,67 N
mikmak1	176	173	165	
mikmak2	171	170	154	
mikmak3	161	160	151	átlag:
mikmak4	136	135	127	156,5 N

Melyből látszik, hogy azoknál a gerendáknál, ahol a makro szálak mellé mikro szálakat is kevertünk a szálerő megnövekszik.

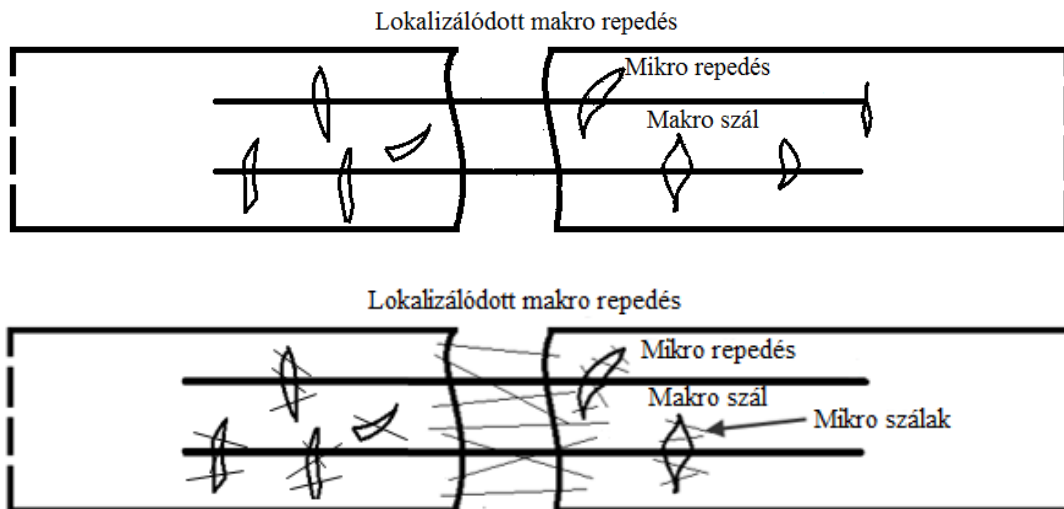
5. Konklúzió

Ezzel előállítottuk a kísérleti görbét az általunk használt modellel, amely igen jó közelítést adott (2. melléklet – F-CMOD görbék) (18. ábra).



18. ábra: Makro4 gerenda F-CMOD ábrája

Mivel a fiktív szálerőben jelentős növekedést találtunk, ebből arra következtetünk, hogy a mikro szálak a makro szálak kihúzódsát gátolják a mikrorepedések összekapcsolásával (19. ábra). Acélszálnál már mutattak ki hasonló eredményt, de szintetikus szálnál eddig nem volt ilyen eredmény [7].



19. ábra - Mikro szálak hatása

Hogy a mikro szál növeli-e és mennyivel a hajlító-húzószilárdságot (vagy javítja-e a mátrix mechanikai jellemzőit), arra jelen dolgozat egyszerűsített betonmodellje nem tud válaszolni.

6. Továbbfejlesztési lehetőségek

A kutatást érdemes lenne különböző irányokban folytatni. Jelenlegi modellünkben a szálak eloszlását a keresztmetszet mentén (ami nagymértékben befolyásolja a keresztmetszet teherbírását) a kísérleti gerendákon számoltuk meg. Erre létre lehetne hozni egy külön programot, ami a szálak keveredését, irányszögeit (a mi modellünk ezt teljes mértékben hanyagolja) kísérelné meg modellezni.

További fejlesztési lehetőségként vizsgálhatnánk, hogy az általunk számolt fiktív szálerő hogyan viszonyul a valóságoshoz. Természetesen itt is további problémák merülnek fel: hogyan befolyásolja a lehorgonyzódás, illetve mit számít, ha a szál nem párhuzamos a kihúzó szögével.

Jelen próbatestek ugyanolyan minőségű betonnal és száltartalommal készültek. Kísérleteket lehetne folytatni a betonmátrix jellemzőinek változtatásával és így megkeresni az optimális mikro és makro szál arányt a különböző betonokhoz.

7. Összefoglalás

A szálerősítésű betonok egyre szélesebb körben terjednek el, ma már nem csak az ipari padlóhoz alkalmazzák, mint kezdetben, hanem tartószerkezeti elemekhez is használják. A mikro és makro szálak viselkedését külön-külön már több ízben megvizsgálták, a mi tanulmányunk a két száltípus együttes hatását vizsgálja.

Kísérletünkben összehasonlítottuk a szálerősítés nélküli beton, a mikro szálas, makro szálas és a mikro-makro szálkottélos beton duktilitásának változását a száltípus függvényében. A különböző szálerősítésű betonból készült gerendákat három pontos (felezőpontos) hajlítási teszttel vizsgáltuk. Összehasonlítva az eredményül kapott erő-repedésmegnyílás (CMOD) diagramokat látható volt, hogy a csak mikro szállal erősített gerendák majdnem ugyanolyan ridegen törtek, mint a normál beton, míg a makro szálas és szálkottélos betonok viselkedése duktilissabbá vált. Ezt a duktilitást az F-CMOD ábra alatti területtel szemléltethetjük legjobban. A kísérletekből sejthető volt, hogy a szálkottéllal erősített beton duktilitása nagyobb, ám az eredmények nagy szórása miatt ezt tényszerűen nem jelenthettük ki.

A szakirodalomban található két modell nem igazolja a sejtésünket, ezért helyette olyan modellt használtunk a szálerősítésű betonok számítására, ami figyelembe veszi a szálak valós eloszlását. Modellünk a szakirodalomban található elkent (smeared) és diszkrét (VEM és DEM) modellek között félúton van.

A számításunkban az egyes gerendák tényleges száleloszlását figyelembe véve határoztuk meg a nyomaték-görbület ábrát. Ebből az erő-repedésmegnyílás görbéket a Bazant modell alapján számítottuk. A szálak kihúzódásához tartozó erőre nem található pontos adat a szakirodalomban. Jelen modellben konstansnak feltételeztük és inverz analízissel határoztuk meg a kísérleti és a számolt gerendák szálmunkájának (F-CMOD ábra alatti terület) egyenlőségéből. A vizsgált esetekben az így számított, fiktív szálerő átlagára 29 %-kal nagyobb értéket kaptunk szálkottélos gerendáknál, mint a csak makro szállal erősítetttnél. Ebből az értékből ki van küszöbölve a száleloszlás okozta jelentős szórás, így jól használható a mikro szálak okozta hatás (növekmény) jellemzésére.

Ezzel kimutattuk, hogy a két szál együttes hatása nem csupán az egyes száltípusok duktilitás-növekményét összegzi, hanem egymást erősítve, jóval nagyobb hatást ér el. Eredményeink alátámasztják a kezdeti feltételezésünket, hogy a mikro szálak hatással vannak a makro szálak és a betonmátrix közötti kapcsolatra, növelve az együttdolgozást, illetve a szál kihúzódási ellenállását a mikro repedések összekapcsolásával, ami végső soron a duktilitás növekedését eredményezi.

8. Köszönetnyilvánítás

A szerző itt szeretne köszönetet mondani első sorban konzulenseinek, Pluzsik Anikónak és Juhász Károly Péternek a kitartó támogatásukért, hasznos tanácsaikért, továbbá Óvári Vilmos betontechnológusnak és a Czakó Adolf Laboratórium technikusának, Sebestyén Ottónak a betongerendák elkészítésében nyújtott nagy segítségért.

A cementet a LAFARGE Cement Magyarország Kft. szolgáltatta, az adalékanyagokat pedig a York bánya. A szálakat és a keverőgépet a Fiberguru Kft. biztosította. A kísérletekhez használt ZWICK/ROELL Z150 típusú univerzális anyagvizsgáló gépet a TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 pályázat biztosította.

9. Irodalomjegyzék

- [1] British-Adopted European Standard: *Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity, Standard BS EN 14889-2:2006* (2006).
- [2] Juhász K.P.: Fibre reinforced concrete calculations in ultimate and serviceability limit state. In: *Innovative Materials and Technologies for Concrete Structures: CCC2011*. (2011) pp. 277-280, paper 55. ISBN: 978-963-313-036-0.
- [3] Juhász K.P.: Szintetikus makro szálerősítésű beton gerendavizsgálatok kiértékelése a valós száleloszlás vizsgálata alapján. *Anyagvizsgálók lapja* (2013) 3-4, pp. 93-97.
- [4] Juhász K.P.: Szintetikus mikro és makro szálerősítésű betonok közötti különbségek. *Beton* (2013) XXI. évf. 11-12. szám.
- [5] Kollár L.: *Vasbetonszerkezetek I.*, Műegyetemi kiadó, 1998.
- [6] Macanovskis, A., Lusic V. és Krasnikovs A.: Polymer fiber pull out experimental investigation. In: *4th International Conference CIVIL ENGINEERING`13*. (2013) pp. 104-111, ISSN 2255-8861.
- [7] Nishiwaki, T., Kwon, S., Homma, D., Yamada, M., Mihashi, H.: Self-Healing Capability of Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Recovery of Watertightness and Mechanical Properties. *Materials* (2014) pp. 2141-2154. ISSN 1996-1944.
- [8] Vandewalle, L., et al.: RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, Vol. 33 (2002), January-February, 3-5.

10. Mellékletek

1. melléklet – program leírás

```
makro1=[18,11.5,6.5,21.5,20]
makro2=[44,22,21,11.5,16.5]
makro3=[18,16.5,18.5,12.5,16.5]
makro4=[15,21,16,24.5,14.5]
mikromakro1=[14.5,12.5,21,15.5,20]
mikromakro2=[8.5,8.5,11.5,16,12.5]
mikromakro3=[21.5,11.5,16.5,19,17]
mikromakro4=[31,21,29,9.5,19.5] (a gerendák szálszámjai)
Fszalmakro1=137
Fszalmakro2=118
Fszalmakro3=125
Fszalmakro4=127
Fszalmikromakro1=173
Fszalmikromakro2=170
Fszalmikromakro3=160
Fszalmikromakro4=135 (szálerők)

Ec=30000
ft=4.095
Fszal=Fszalmikromakro4
b=150
sor=mikromakro4
szalszam=0
h=125
l=500 (eddig voltak a bemenő adatok)

sorossz=[]
for i in range(len(sor)):
    szalszam+=sor[len(sor)-1-i]
    sorossz.insert(0,szalszam) (összeadja a szálszámokat a kellő mennyiségű sávban)
tav=[12.5,37.5,62.5,87.5,112.5] (sávok közepének távolságai a szélső száltól)
dk=10(-7)
k=0
M=[]
x=h/2
x1=0
dx=100
F=[]
a=[]
cmod=0
wf=0 (változók felvétele eddig)

while cmod<4:

    cmodv=cmod

    #repedés előtt
    if (k*Ec*h/2<=ft):
        # nyomaték számolás
        Mm=k*Ec*b*h3/12
```

```

M.append([k,Mm])
a.append(0)
Fm=4*Mm/500 (repedés előtti M számítása, abból F átszámolása)

#repedés után
else:
    # nyomott keresztmetszet
    x1=ft/(k*Ec) (húzott betonzóna)
    #x1=0 (ha ez nem megjegyzés, akkor húzószilárdás nélküli számítás)
    for i in range(len(tav)):
        if (i>0):
            if (x+x1<tav[4-i]): (ha a nyomott és a húzott betonzóna összege kisebb, mint az adott száltávolság...)
                x=sqrt((2*sorossz[4-i]*Fszal+b*x1*ft)/(b*Ec*k)) (...akkor x-et annak a sornak a figyelembe
vételével, de az annál fentebbi sorok kihagyásával számolja)
                iv=4-i
            else:
                x=sqrt((2*sorossz[4]*Fszal+b*x1*ft)/(b*Ec*k)) (ha nem, akkor az összes szalat beleveszi)
                iv=4
        a.append(4-iv)

#nyomaték számolás
ny=0
for j in range(iv, len(tav)):
    ny+=tav[j]*sor[j]*Fszal (szálnyomaték kiszámítása sávonként, az adott száltól)
Mm=- (Ec*k*x^3*b/6)+ny+b*x1*ft/2*(x+2*x1/3) (nyomaték számítása)
M.append([k,Mm])
Fm=4*Mm/500

# cmod számítás
cmodv=cmod
xw=h+25-x+2 (semleges tengely és a cmod mérőeszköz távolsága)
cmod=xw*k*dx (cmod számítása)
F.append([cmod,Fm]) (kirajzoltatás)
wf+=(cmod-cmodv)*Fm (szálmunka számítása)

k+=dk

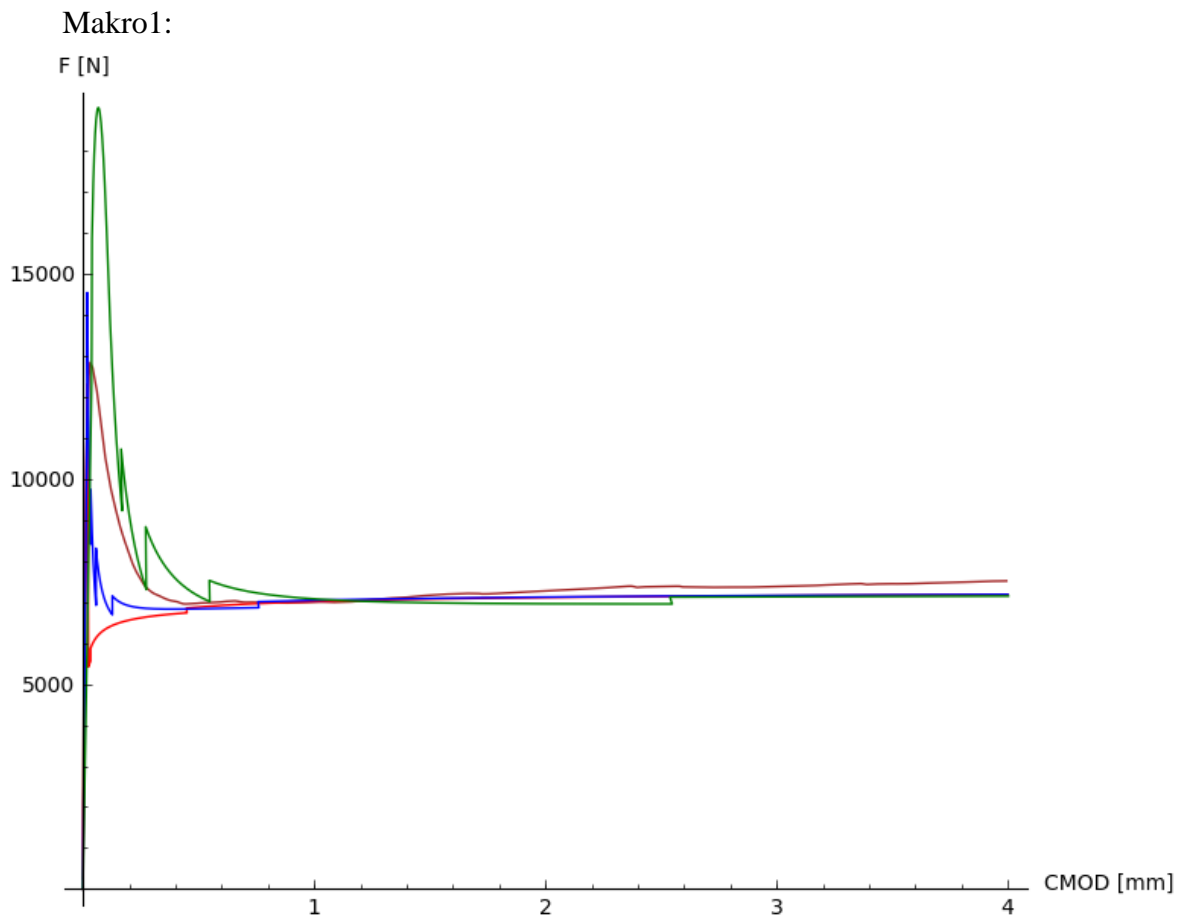
wf.numerical_approx()

```

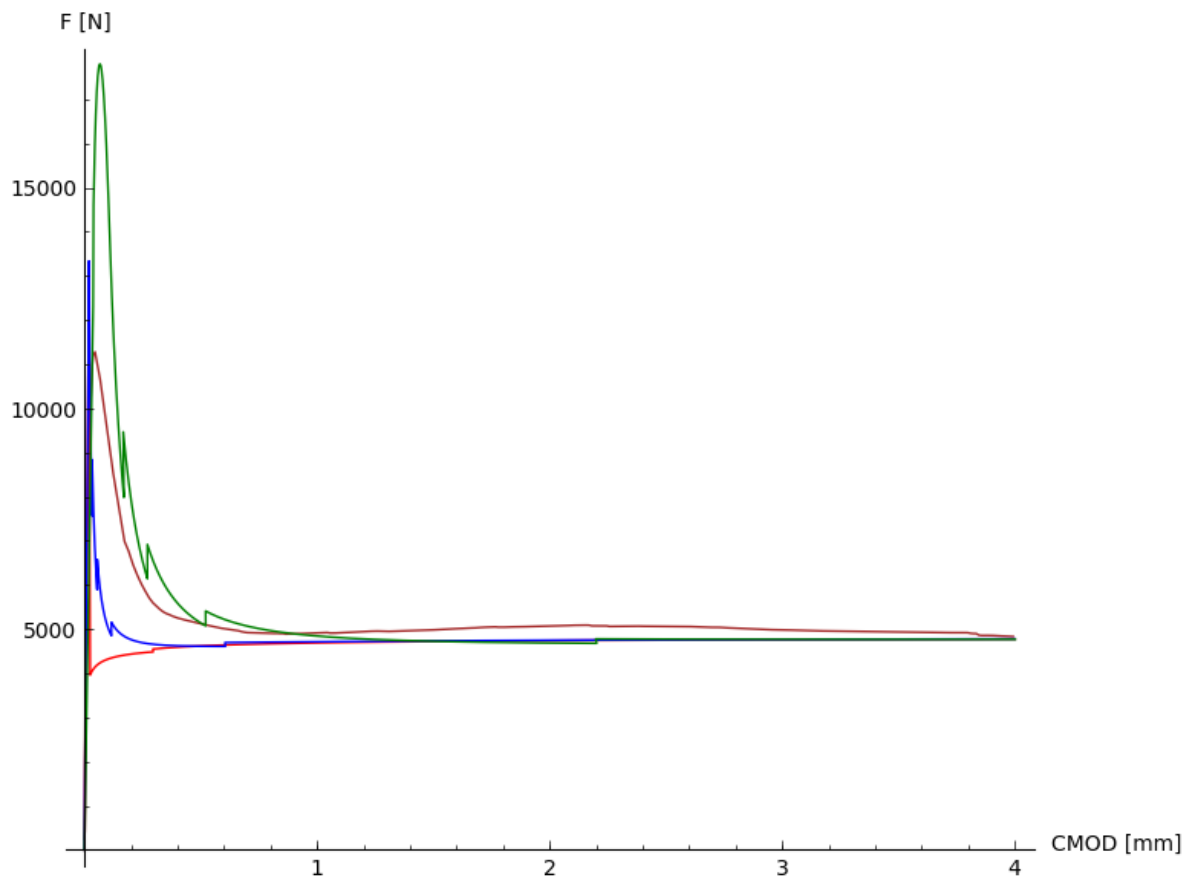

2. melléklet – F-CMOD görbék

Jelmagyarázat:

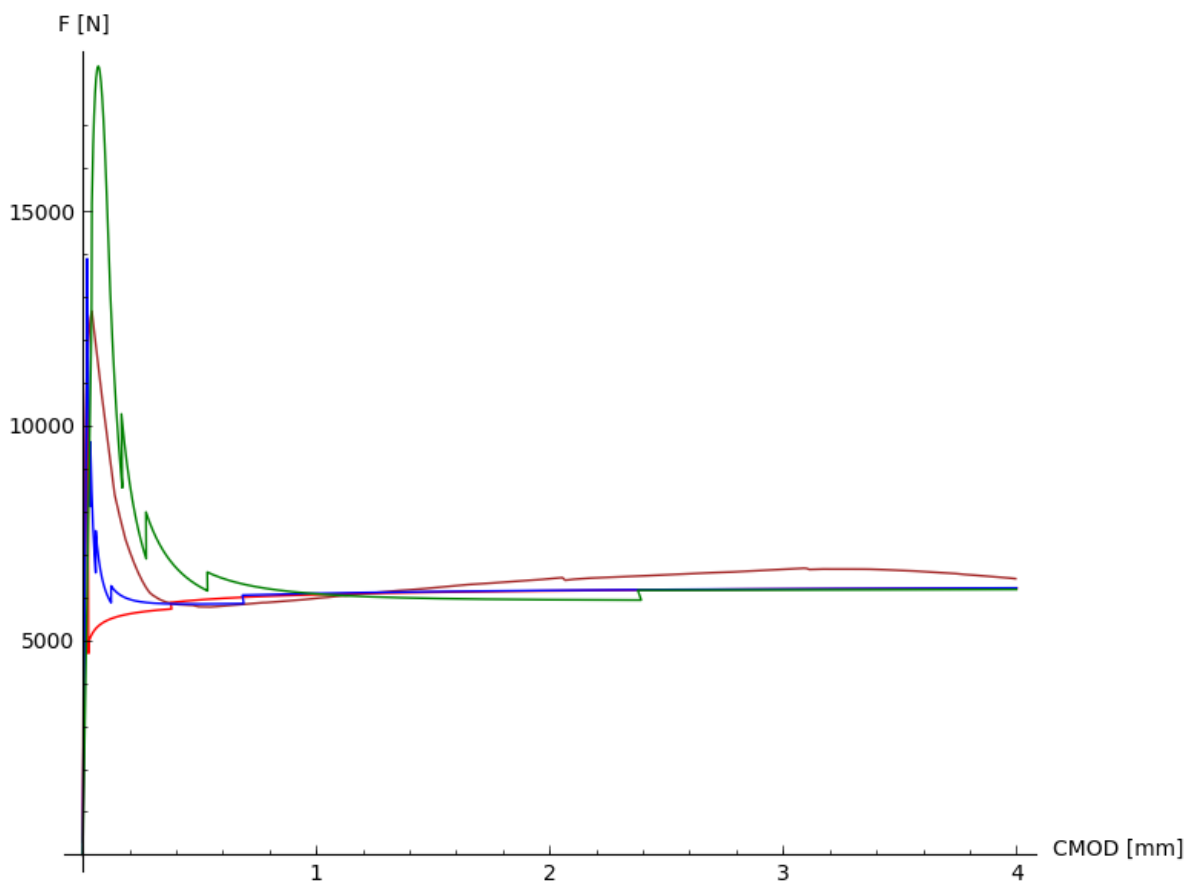
- Kísérleti görbe
- Húzószilárdság figyelembevétele nélkül számolt görbe
- Húzószilárdság lineáris közelítésével számolt görbe
- Húzószilárdság redukciójának figyelembe vételével számolt görbe



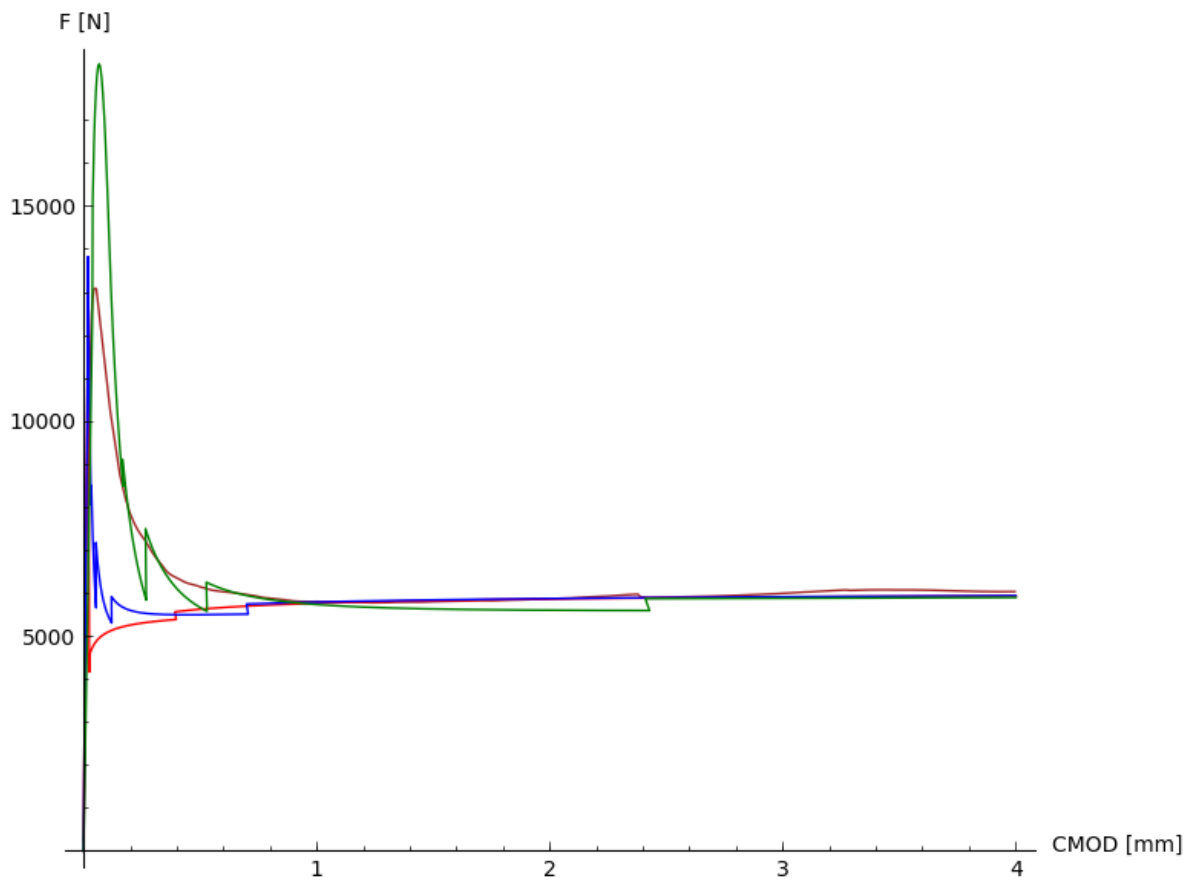
Makro2:



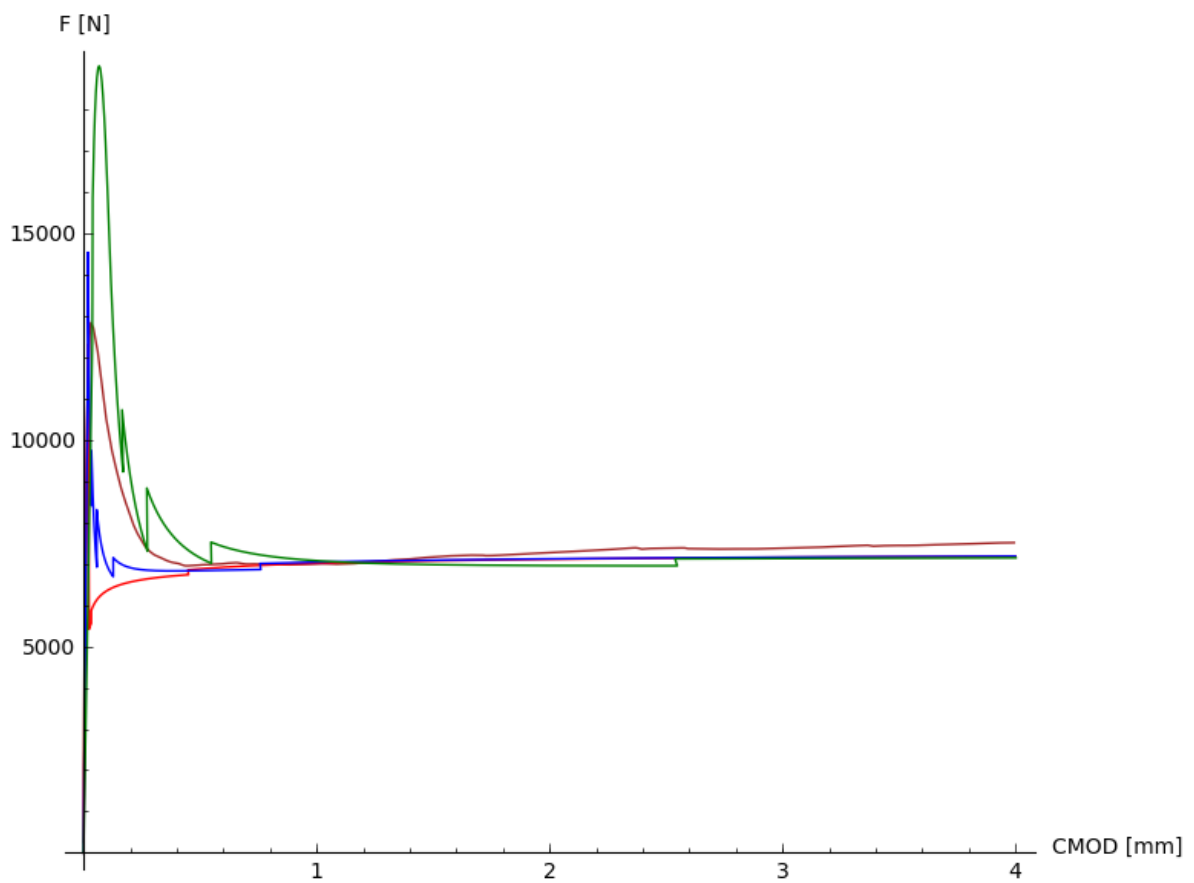
Makro3:



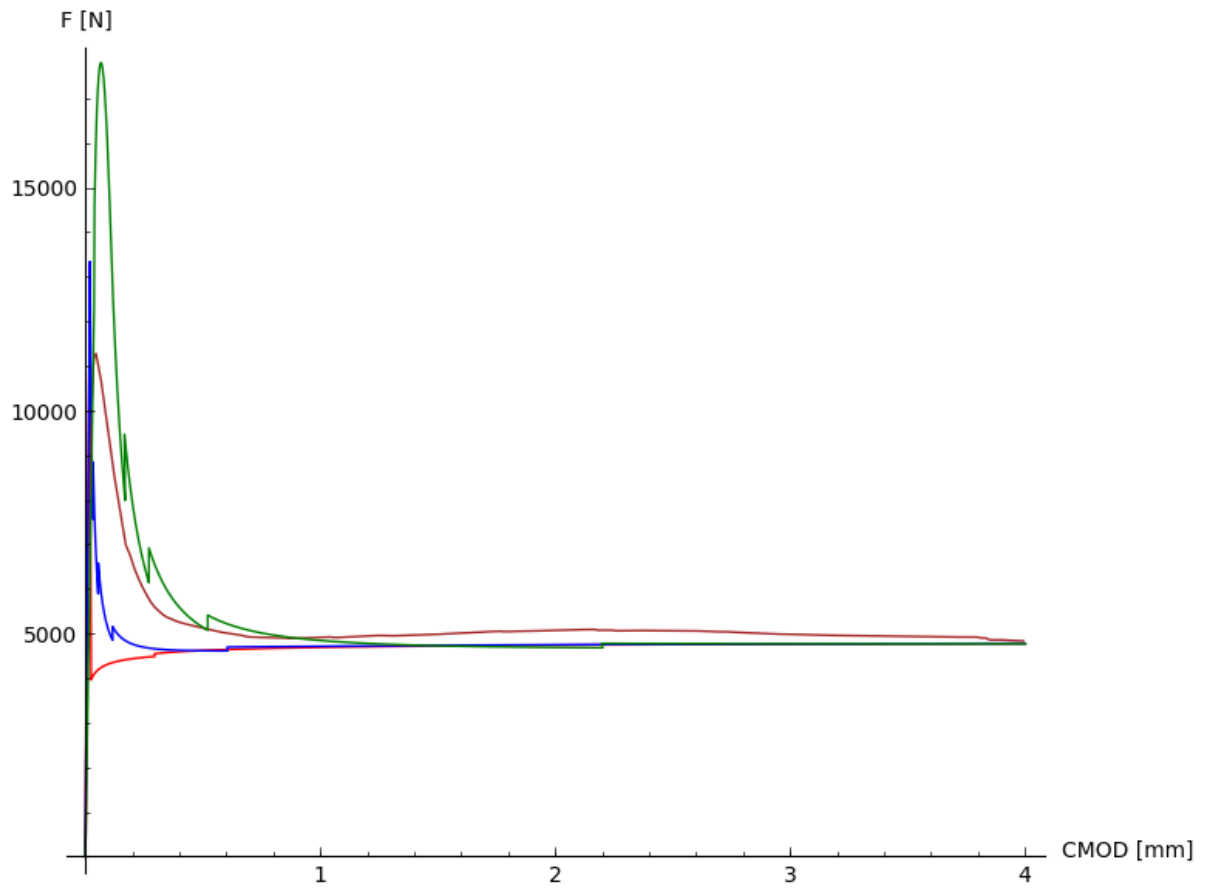
Makro4:



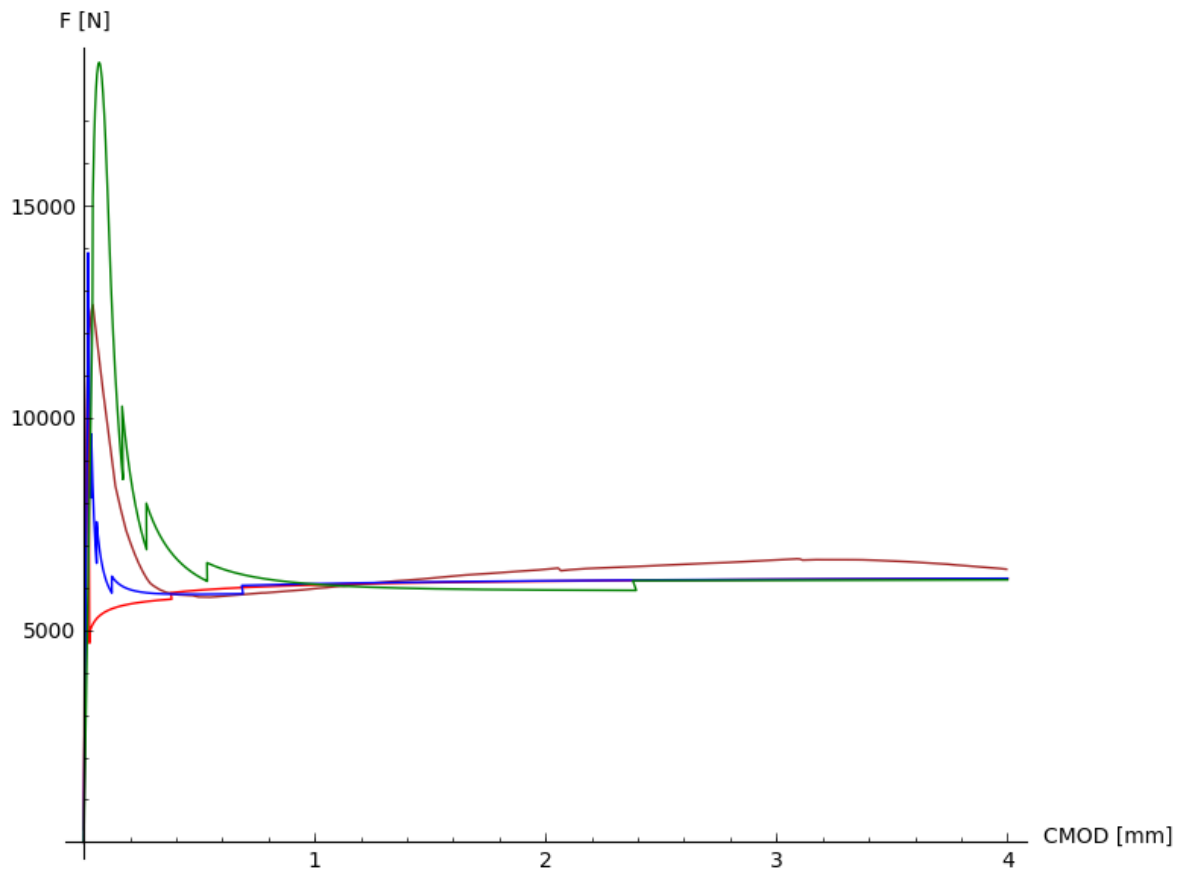
Mikromakro1:



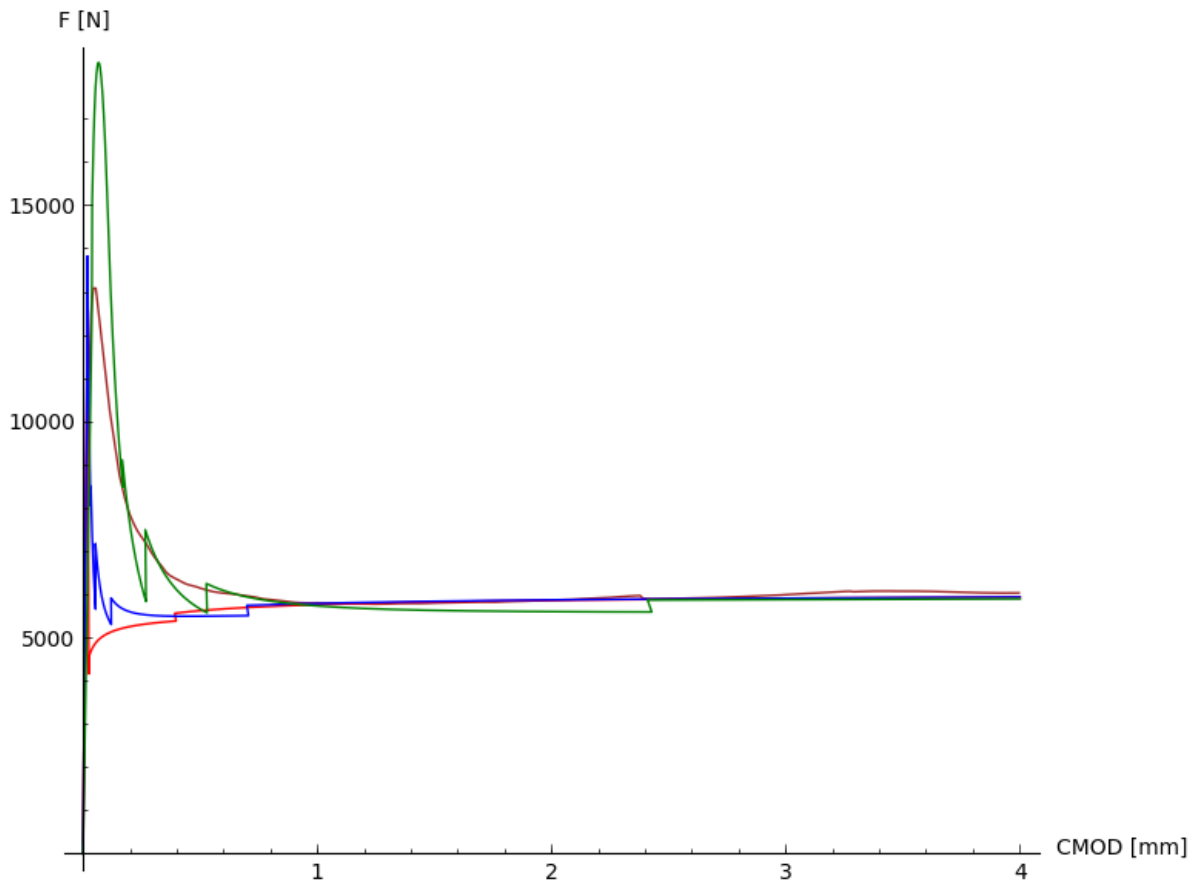
Mikromakro2:



Mikromakro3:



Mikromakro4:



3. melléklet – beton összetétele

Beton szilárdsági osztálya		C30/37-16-F3
cement	355 kg	CEM III/A 32,5 N-MSR Lafarge
víz	160 kg	
0/4 homok	750 kg	
4/8 kavics	375 kg	
8/16 kavics	750 kg	
folyósító	0,80 kg	MAPEI SR3
víz/cement	0,451	

4. melléklet – szálmegoszlás a keresztmetszet mentén

makro1	kihúzódt bal	kihúzódt jobb	szakadt
1.sáv	3	12	3
2.sáv	2	7	2,5
3.sáv	4	0	2,5
4.sáv	5	10	6,5
5.sáv	6	7	7

makro2	kihúzódt bal	kihúzódt jobb	szakadt
1.sáv	25	18	1
2.sáv	13	6	3
3.sáv	13	4	4
4.sáv	8	3	0,5
5.sáv	8	5	3,5

makro3	kihúzódt bal	kihúzódt jobb	szakadt
1.sáv	8	7	3
2.sáv	3	10	3,5
3.sáv	10	5	3,5
4.sáv	5	3	4,5
5.sáv	6	7	3,5

makro4	kihúzódt bal	kihúzódt jobb	szakadt
1.sáv	3	10	2
2.sáv	4	11	6
3.sáv	7	7	2
4.sáv	11	7	6,5
5.sáv	6	3	5,5

mikromakro1	kihúzódt bal	kihúzódt jobb	szakadt
1.sáv	6	5	3,5
2.sáv	4	3	5,5
3.sáv	5	11	5
4.sáv	5	5	5,5
5.sáv	7	9	4

mikromakro2	kihúzódt bal	kihúzódt jobb	szakadt
1.sáv	4	3	1,5
2.sáv	1	4	3,5
3.sáv	5	6	0,5
4.sáv	5	6	5
5.sáv	5	5	2,5

mikromakro3	kihúzódot bal	kihúzódot jobb	szakadt
1.sáv	14	4	3,5
2.sáv	4	3	4,5
3.sáv	6	8	2,5
4.sáv	6	11	2
5.sáv	5	8	4

mikromakro4	kihúzódot bal	kihúzódot jobb	szakadt
1.sáv	7	15	9
2.sáv	9	5	7
3.sáv	13	8	8
4.sáv	1	6	2,5
5.sáv	7	7	5,5