



---

B U D A P E S T I   M Ű S Z A K I   É S   G A Z D A S Á G T U D O M Á N Y I   E G Y E T E M  
É P Í T Ó A N Y A G O K   É S   M É R N Ö K G E O L Ó G I A   T A N S Z É K  
Tel: 463-4068 \* 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. \* Fax: 463-3450

## **Betontechnológia Szakirányú Továbbképzés**

### **DIPLOMAMUNKA FELADAT**

**Juhász Károly Péter**  
okleveles építészmérnök

**A diplomamunka címe:** Szintetikus makro szálerősítésű betonok  
**Irányító tanszék:** Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék  
**Nyilvántartási szám:** BT-Juhász Károly Péter/2013  
**Egyetemi konzulens:** Dr. Zsigovics István  
**Ipari konzulens:**

**A feladat kiadásának időpontja:** 2013. szeptember 1.

**A diplomamunka beadási határideje:** 2014. január 6.

Budapest, 2013. szeptember 1.

Dr. Balázs L. György  
egyetemi tanár, tanszékvezető  
tanfolyamvezető



## Betontechnológia Szakirányú Továbbképzés

### DIPLOMAMUNKA FELADAT

**Juhász Károly Péter**  
okleveles építészmérnök

A diplomamunka címe:  
**Szintetikus makro szálerősítésű betonok**

#### A téma leírása:

Hazai gyakorlatban a beton szintetikus szálerősítésről a mérnököknek, kivitelezőknek, de gyakran még a betontechnológusoknak is a *szintetikus mikro* szál jut eszükbe, habár léteznek *makro szálak* is, ráadásul a közöttük lévő különbségek jelentősek. Míg a szintetikus mikro szálaknak a repedés után gyakorlatilag nincs statikai hatásuk a szerkezetre, addig a makro szálak statikai szempontból hasonlóan viselkednek az acélszálakhoz.

Bár a szintetikus makro szálerősítésű betonokat sok támadás éri a polipropilén anyag viszko-elasztikus volta és alacsony rugalmassági modulusa miatt, beton kompozitként azonban hasonlóan viselkednek, mint az acél szálerősítésű betonok, mind rövid, mind hosszú idejű terhelésnél. Legfőbb előnyük a teljes korróziómentesség, amely önmagában okot ad a szintetikus makro szálerősítések további vizsgálataira, kutatására.

Jelen diplomamunkában saját és külföldi kutatási eredményeket figyelembe véve vizsgálom meg a szintetikus makro szálak alkalmazásának hatását betontechnológiai szempontból, majd felhasználási lehetőségeire mutatok számos példát.



## Tartalomjegyzék

### 1. Bevezetés. A téma fontossága

- mi az a szálerősítésű beton
- miért jó a szintetikus anyag
- mi az előnye, hátránya a beton szintetikus szálerősítésnek
- miért érdemes kutatni

### 2. Szakirodalmi áttekintés

### 3. Történelmi áttekintés

- szálerősítések története
- vasbeton és a szálerősítésű beton története
- szintetikus makro szálak története, kialakulása

### 4. Beton szálerősítések fajtái, csoportosítása

- anyaguk szerint: ACI 544 szerint
- mikro és makro: BS EN 14889 szerint
- mikro és makro szintetikus szálak közötti különbségek
- acél és szintetikus makro szálak közötti különbségek

### 5. Vizsgálati módszerek

- húzóvizsgálat
- gerenda teszt
- körpanel teszt
- hasító vizsgálat
- wedge splitting teszt

### 6. Saját kutatási eredmények - A Nagy Törés 2012

- a kutatás bemutatása
- kísérleti mátrix
- betonreceptúra
- szemeloszlási görbe
- eredmények kiértékelése
- következtetések

### 7. Szálak adagolásának hatása a betontervezésre

- péptartalom
- konzisztencia változása: roskadás, terület
- szemnagyság hatása
- különleges betonok: önterülő szálerősítésű, nagyszilárdságú szálerősítésű

### 8. Hazai és nemzetközi példák szintetikus makro szálerősítések alkalmazására

- ipari padlók
- lóttbeton szerkezetek
- alagutak
- út és vasút pályalemezek
- nyírási vasalás

### 9. Összefoglalás

### 10. Hivatkozások



## 1. Bevezetés, a téma fontossága

A szálerősítésű anyagok története nagyon régre vezet vissza. Már az ókori Egyiptomban is használtak állati és növényi eredetű szálakat a vályogtéglák erősítésére. A betonba kerülő szálerősítés teljesen hasonló elven alapszik: egy kvázi-rideg anyagból a szálak segítségével duktilisabb kompozit anyagot készítünk, megváltoztatva ezzel az anyag előnytelen tulajdonságait.

A betonba kerülő szálerősítések első fajtája az acél szálerősítés volt, amelynek típusai, alkalmazási módjai és méretezési módszerei azóta is folyamatosan fejlődnek. Csak néhány évtizedes múltra tekint vissza a szintetikus makro szálerősítés, amely talán még rohamosabban fejlődik, mint az acél. Ez olyan előnyös tulajdonságoknak tudható be, mint a korróziómentesség vagy az egyszerűbb bedolgozhatóság.

A szintetikus makro szálak legfőbb előnye a teljes korróziómentességben rejlik. A betonba helyezett acél anyagú erősítés csak a beton által biztosított 12-14 Ph-jú lúgos környezetben marad korróziómentes. A beton felületén azonban a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  átalakul  $\text{CaCO}_3$ -tá, amely 7 pH-jú, ez már nem elegendő az acél védelméhez. Ezt a folyamatot karbonátosodásnak nevezzük (Balázs, 2007). Acél szálerősítésnél a betonfedésben levő acélszálak hatását nem szabad figyelembe venni. Sérülés, repedés esetén a levegővel érintkező acélszálak ugyancsak rozsdásodásnak indulnak.

További előny az acélszálakkal szemben a szintetikus makro szálak bedolgozhatósága. Míg az acél szálerősítésnél a szálak lehorgonyzását legtöbb esetben a kampósan kialakított szálvégek adják, addig a szintetikus makro szálak esetében a szál felületének bordázása vagy hullámos alakja adja. Az acél anyagmerevsége is sokkal nagyobb a szintetikus száléhoz képest, így keverésnél ez is további problémát okoz. Az acél szálak kampós végüknél fogva egymásba akadnak, a betonban levő kavicsokkal együtt merev labdát képeznek, amelyek hógolyószerűen a keverés során egyre csak nőnek. Ezeket a szál-labdákat a keverésnél ki kell venni a betonból, ezzel is csökkentve a száltartalmat (Balázs, 2002; Halvax és Lublőy, 2012). Szintetikus szálak esetében ritkábban keletkeznek ilyen szál-labdák, vibrálásakor elemi szálakra esnek szét, így a bedolgozhatóságuk könnyebb (Juhász, 2014).

Hazai gyakorlatban a szintetikus mikro és makro szálak közötti különbségeket a betonipar dolgozói kevésbé ismerik, így sokszor mikro szálakat alkalmaznak statikai erősítésnek (fibrillált szálak), illetve a mikro szálakból kiindulva előítélettel kezelik a makro szálakat is (Juhász,



2013, a). Adagolásukat tekintve csak a gyártói előírásokra támaszkodhatunk, holott a szálak hozzáadása betontechnológiai módosításokat is igényelne. Mivel a szintetikus makro szálak előnyös tulajdonságaik miatt egyre jobban elterjednek a betoniparban, így kutatásuk is egyre fontosabbá válik.

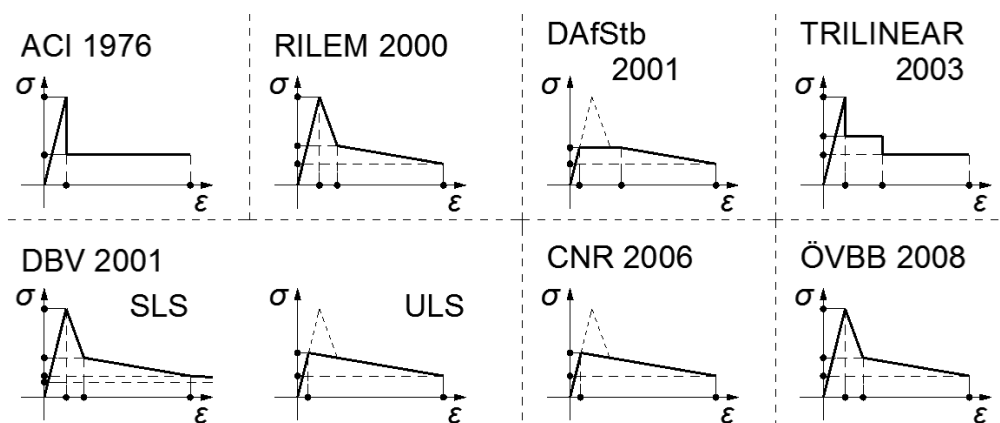
## 2. Szakirodalmi áttekintés

A szálerősítésű betonok kutatása során a kutatások leginkább az acél szálerősítésre fókuszálnak, azon belül is a szálerősítésű beton anyagmodelljének megalkotására. Az anyagmodell meghatározására alapvetően több eljárás létezik: a tiszta elméleti módszertől egészen a teljesen empirikusig. A közelítő elméleti számításokkal meghatározott anyagmodell az adagolás-mennyiségből (száeloszlás, szálorientáció), szálátmérőből, szálhosszból és szálalakból következtetnek az összetett anyag mechanikai tulajdonságaira. Ilyen módon határozza meg az acélszál erősítésű beton anyagmodelljét Lok és Xiao (Lok és Xiao, 1999), Voo és Foster a VEM segítségével (Variable Engagement Model) (Voo és Foster, 2003), Lee, Cho és Vecchio a DEM segítségével (Diverse Embedment Model) (Lee, Cho és Vecchio, 2011), hazai kutatók közül pedig Kovács Imre és Balázs L. György (Kovács és Balázs, 2004). Az anyagmodell meghatározásának másik módszere a teszteredményeket veszi alapul. Erő és repedésmegnyílás (CMOD, Crack Mouth Opening Displacement) értékeiből állítja elő acélszál erősítésű betonokhoz Casanova és Rossi (Casanova és Rossi, 1997) és Zhang és Stang (Zhang és Stang, 1998) a feszültség-megnyúlás kapcsolatot.

A pusztán elméleti számítások gyakorlati alkalmazása nagy körültekintést igényel. A kész szálerősítésű beton minőségét számos tényező befolyásolja (adalékanyag, cement, keverővíz, stb.) (Magyari, 1999). Ennek tükrében a szálerősítésű betonok méretezésének kérdését az osztrák irányelv, Richtlinie Faserbeton (ÖVBB, 2008) úgy próbálja meg általánosítani, hogy nem tér ki a szál paramétereire, adagolására és a beton minőségére, szilárdsági osztályára, hanem kizárólag a szabványosított gerenda terhelési kísérletekből kapott eredményekre összpontosít. Ezen adatok alapján osztályba sorolja a szálerősítésű betonokat, majd ezen osztályokhoz tartozó értékek alapján a  $\sigma(\varepsilon)$  diagram definiálható. Így a szálerősítésű betonról, mint önálló anyagról beszél, ami teljesíti az osztályának megfelelő követelményeket. Az osztrák irányelv megad egy ún. „nemlineáris” és egy „lineáris” feszültség-megnyúlás diagramot. Míg az elsőt végeelem számításokhoz, addig a másodikat egyszerűbb, kézi számításokhoz ajánlja.



Habár számos előírás és irányelv létezik szálerősítésű betonok felhasználásához és méretezéséhez, közülük csak kevés tesz említést a szintetikus makro szálakról. Legtöbb esetben a teszteredményekből feszültség-megnyúlás kapcsolatot állítanak elő, amely végeselem programokhoz a karakterisztikus hossz ( $l_{cs}$ ) definiálása nélkül alkalmatlan (Bazant és Oh, 1983; Foote, Mai és Cotterell, 1985; Hu és Wittmann, 1990) (1. ábra).



1. ábra: szálerősítésű beton  $\sigma(\epsilon)$  anyagmodelljei különböző ajánlások alapján

Szintetikus makro szálerősítésű betonok tervezésénél így kiindulhatunk az acél szálerősítésű betonhoz használt ajánlásokból vagy irányelvekből, de minden esetben feltételekkel kell kezelnünk azokat.

### 3. Történelmi áttekintés

A betonban alkalmazott erősítés története a vasbetonnal kezdődött 1855-ben, amikor Joseph-Louis Lambot Franciaországban szabadalmat adott be vas erősítésű beton csónakra. 49 évvel később, 1903-ban már meg is jelent az első épületekre vonatkozó vasbeton szabályzat Svájcban, 1909-ben pedig már Magyarországon is (Deák és Dulácska, 1994). A vasbetonra azóta is újabb és újabb szabványok, méretezési irányelvek, számítási módszerek jelennek meg a világon mindenhol, az egyik legtöbbet alkalmazott anyag az építőipar számos területén.

A szálerősítésű betonra a szabadalmat a vasbeton csónak után 19 évvel, 1874-ben A. Berard adta be Amerikában, Kaliforniában: szabálytalan acél hulladékkal erősített beton néven (Maidl, 1995). Ez után jelentek meg a különféle mérnöki tervezésű acélszálak, mint például a kampós végű, hullámos vagy dombornyomott típusok. Az acélszállal erősített betonok a szálerősítésű betonok jelentős részét teszik ki. Hazai bevezetése Polgár László



nevéhez fűződik. Először leginkább ipari padlóknak használták, de egyre inkább kezd elterjedni a nyírási vasalások kiváltásánál is.

A szintetikus szálaznál először a szintetikus mikro polipropilén szálak jelentek meg, amelyet 1982-ben a Propex amerikai cég vezetett be Fibermesh néven ([www.fibermesh.com](http://www.fibermesh.com)). Anyaga polipropilén, hossza 12,7 mm (1/2 inch). Ezek azonban nem töltöttek be statikus szerepet, mint az acélszálak, csak a kezdeti mikro repedések kialakulásának meggátolásában vettek részt. A kezdeti makro szintetikus szálak anyaga viszont nem rendelkezett még kellően magas szakítószilárdsággal és rugalmassági modulussal, hogy statikai szerepüket is figyelembe lehessen venni. Az első ilyen próbálkozás a 3M nevű céghez fűződik, azonban sem geometriai kialakítása, sem mechanikai tulajdonsága nem tette alkalmassá arra, hogy az acél szál konkurenciája lehessen, ráadásul az alkalmazandó szál beton köbméterre vetített ára is jóval magasabb volt, mint az acélé. Az 1980-as és 90-es években azonban a textil és szövetipar fejlődése révén kifejlesztettek olyan nagy szilárdságú szintetikus anyagokat, amelyekkel már olyan makro szálakat lehetett gyártani, amelyek versenybe tudtak szállni az acél szálakkal. Nehéz tehát megmondani, ki is fejlesztette ki az első mai értelemben vett szintetikus makro szálakat. Több olyan cég is van, akik már a kezdetektől jelen vannak a piacon, ilyen a *Polymer Group Inc.* (USA), *Grace Construction Product* (USA), *Forta Corporation* (USA), *Elasto Plastic Concrete* (Japán - Ausztrália), *Adfil Construction Fibres* (Anglia). A szintetikus szálak térhódítását mi sem jelzi jobban, mint az, hogy a legnagyobb acélszál gyártó és forgalmazó: a Beakert is rendelkezik saját gyártású szintetikus makroszállal ([www.beakert.com](http://www.beakert.com)).

Hazai forgalomban először a *High Grade* fibrillált mikroszállal értek el jelentős sikereket, igaz túlértékelték a szerepét: statikus szálként használták, holott repedés utáni hatása elenyésző (Juhász, 2013, a). Az első hazai makro szálak a *Propex Enduro HPP* és a *Elastoplastic Concrete (EPC) Barchip 48* típusú termékek voltak. Ipari padlók mellett villamospálya építésnél és előregyártásban használták és használják sikeresen őket.

#### 4. Beton szálerősítések fajtái, csoportosítása

A szálerősítésű betonok a szerkezeti anyagok csoportján belül a kompozitok osztályába tartoznak, azon belül pedig a rövid szálas kompozitok közé, ahol a szálak a szerkezet vagy keresztmetszet méreteihez képest relatív rövidek, véletlen és homogén eloszlásúak és különféle anyagúak és alakúak lehetnek (Kollár és Springer, 2003).



Anyaguk szerint az ACI (ACI 544, 2002) 4 fő csoportra osztja a szálakat, míg a polipropilén szálakat geometriai méretük alapján a brit BS EN 14889 nevű szabvány (BS EN 14889, 2006) másik két fő csoportra. Ezt az 1. táblázatban foglaltam össze.

| ACI 544                          |                                     |                                                       |                                                     |                                    |                |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|
| SFRC<br>acélszálak               | GFRC<br>üvegszálak                  | SNFRC<br>szintetikus és<br>karbon                     | NFRC<br>természetes                                 |                                    |                |
|                                  | - alkáliálló<br>- nem<br>alkáliálló | Ia) monoszálak<br>Ib) fibrillált szálak               | - sziszálkender<br>- kókusz<br>- cukornád<br>- stb. | Class I<br>MIKRO<br>$d < 0,30$ mm  | BS EN<br>14889 |
| különböző<br>alakú<br>acélszálak | - alkáliálló                        | II) különböző<br>alakú szintetikus<br>és karbonszálak |                                                     | Class II<br>MAKRO<br>$d > 0,30$ mm |                |

**1. táblázat:** a szálak csoportosítása ACI és brit szabvány alapján,  $d$  a szálátmérő

A mikro és makro szálak jelölése a szálak geometriai méreteivel adott, így nem csak a szintetikus szálakat jellemzi. A brit irányelv szerinti csoportosítás másik célja a szálak repedés utáni hatásának figyelembe vétele.<sup>1</sup> Míg a mikro szálak szerepe elsősorban a beton szilárdulásakor keletkező mikropredések kialakulásának meggátlásában kereshető, addig a makro szálak szerepe elsősorban a repedés után jelentkeznek, a betont duktilisabbá teszik, aminek köszönhetően statikailag határozatlan szerkezeteknél a globális teherbírást meg tudja növelni (pl: ipari padlók), illetve szálerősítésű vasbeton szerkezeteknél a berepedt zóna is figyelembe vehető húzásra.

Az acél- és szintetikus makroszálak alkalmazásával kapcsolatban a gyártóktól sok információt kapunk, miért jobb a saját termékük és miért rosszabb a konkurenciáé. A gyártóktól kapott információk sokszor megkérdőjelezhetőek. A hazai piacon még olyan fibrillált mikroszálakkal is találkozhatunk, amelyek esetében a gyártó az acélbetétek kiváltásával reklámozza termékét, holott ez még makro szálak esetében sem mindenhol lehetséges. Nézzük végig az acélszálak és szintetikus makroszálak közötti különbségeket, előnyeiket és hátrányaikat!

<sup>1</sup> „Class II fibres are generally used where an increase in residual flexural strength is required.”





## **Környezetvédelem**

Hazánkban még nem kapott olyan nagy hangsúlyt az ökológiai lábnyom (carbon footprint) szerepe, mint külföldön. Az ökológiai lábnyom röviden összefoglalva az építmény előállítás során a levegőbe jutó CO<sub>2</sub> mennyiségét jelenti, amibe beletartozik az anyagok előállítása és szállítása is. Ezt egy példával szemléltetem. Vegyünk két, azonos teherbírású ipari padlót, amelyeknél az egyikbe 30 kg acélszálat tettek, a másikba pedig 4 kg műanyagszálat beton m<sup>3</sup>-enként. Míg az acélszálok előállításához 100 egység CO<sub>2</sub> került a levegőbe, addig ugyanez az érték egyes műanyagszálok esetében csak 30 egység (Bernard, 2009).

## **Szállítás, keverés, bedolgozhatóság**

Szállításnál a szintetikus szálok tömege mintegy hatoda-nyolcada az ugyanazon teljesítőképesség eléréséhez szükséges acélszálaknak, így itt egyértelmű az előny.

Keverésnél az acélszálok a keverőgép belső felületét rongálják, míg szintetikus szálaknál a puhább anyag miatt ez nem jelentkezik.

Talán a legfontosabb különbség a szál-labdák keletkezése, ami lényegében olyan összecsomósodott szálat jelent, amelyek nem esnek szét elemi szálakra, hanem folyamatosan növekednek, megnehezítve ezzel az elkeveredést. Ilyen leginkább acélszálnál fordul elő, ezeket a betonozás során kiveszik, ezzel is csökkentve a száltartalmat. Szintetikus szálaknál ritkábban fordul elő, de ha mégis, akkor a vibrálás során a labda szétesik elemi szálakra és megfelelően el tud keveredni.

Acélszál erősítésű beton pumpálását 30 kg/m<sup>3</sup>-es adagolásig (0,38 V%) vállalják a hazai betongyárok, szintetikus szálaknál a felső határ nem ismert, de 5 kg/m<sup>3</sup>-es adagolásra (0,86 V%) már volt hazai példa.

## **A szálok mechanikai tulajdonsága**

A szintetikus szálok használata ellen szól az anyag viszko-elasztikus volta, acélhoz viszonyított alacsony olvadási pontja (acél: +1500 C°, polipropilén: +165 C°) és alacsony rugalmassági modulusa (acél: 210 GPa, polipropilén: 3-10 GPa). Ezeket a tulajdonságokat vizsgálva az acélszálakhoz képest egyértelműen háttérbe szorulnak. Ennek ellenére a szálerősítésű beton, mint kompozit anyag tulajdonsága más, mint amire az alkotó anyagok tulajdonságaiból következtetni lehet. Mechanikai szempontból nézve a szálok anyagi tulajdonságai kevésbé érvényesülnek a kompozit anyag tulajdonságainál (pl.: duktilitás,



kúszás), viszont más szempontoknál fontos különbséget tenni (pl.: tűzterherre való méretezésnél a szintetikus szálak megolvadnak).

### **Kompozit mechanikai tulajdonsága**

Korrózióállóság szempontjából egyértelműen a szintetikus szál az előnyösebb. Itt a versenyt talán csak az horganyzott acélszál veheti fel, de ennek ára nagyon magas. A beton felületi sérülése, a kiálló acélszál azonnali rozsdásodást idéz elő, amely további betonfelület leválását okozza (2. ábra). A szálak betontakarása nem biztosítható, a legkisebb repedés esetén rozsdásodás léphet elő. A problémát tovább fokozza a beton szélső kérgében lejátszódó karbonátosodási folyamat, amely során kialakuló alacsonyabb pH érték az acélszálakat nem óvja meg a korróziótól, vagyis a korrózió repedés nélkül is bekövetkezhet (betonacél esetén ezt a szerepet tölti be a betontakarás).



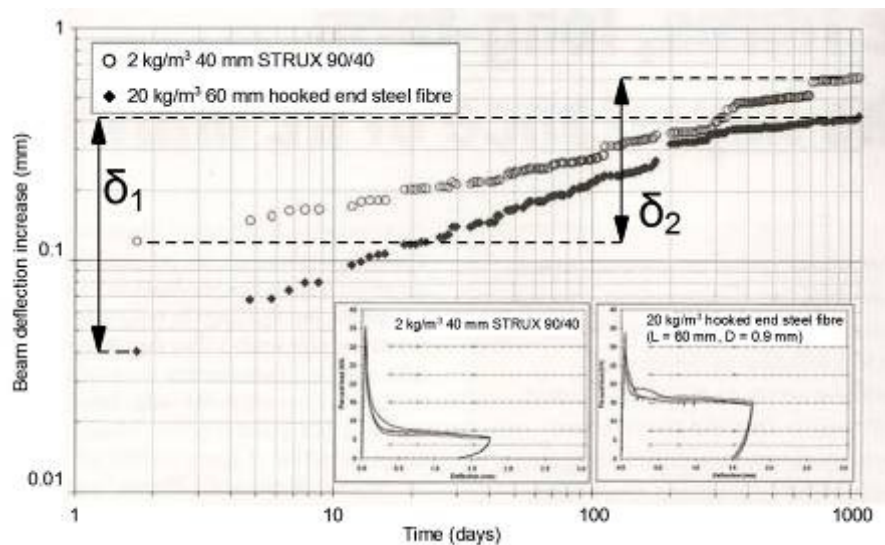
**2. ábra:** acél szál erősítésű beton sérülés utáni rozsdásodása (a szerző felvétele)

### **Időben változó viselkedések: kúszás és öregedés**

Kúszás mérésére az osztrák irányelv ad egy kísérleti módszert, amely kapcsán úgy fogalmaz, hogy acél és műanyag szál erősítésű gerendák kúszását egyszerre kell vizsgálni, amely során az acélszál erősítésű gerendát, mint etalon gerendát kell tekinteni. 2011-ben ért véget egy



1000 napos kúszási vizsgálat (Attree, 2011) az osztrák irányelv ajánlásai alapján, amely meglepő eredménnyel szolgált. A mérések alapján az acélszál erősítésű beton relatív kúszása nagyobb volt, mint a szintetikusé:  $\delta_1 > \delta_2$  (3. ábra). A kúszást nem a szálak anyagi szintű kúszása okozza, hanem mechanikai viselkedése a betonban: a szálak kihúzódnak. Ez a példa is jól mutatja, hogy nem anyagi szinten kell vizsgálni a szálakat, hanem a betonnal együtt kompozit anyagként.



3. ábra: kúszási viselkedés 1000 napon keresztül (Attree, 2011)

A másik időben bekövetkező változás a kompozit öregedése, ami szálak biztosította maradó feszültség csökkenésében, ezáltal energia elnyelő képességében (duktilitásában) mutatkozik meg. A beton szabványos vizsgálata 28 napos korban történik, ezt alkalmazzák a szálerősítésű betonra is. Ez az energia elnyelő képesség a kísérletek eredménye szerint azonban időben változik, acélszálak esetében csökkenhet, míg szintetikus szálak esetében nőhet. Bernard végzett kutatásokat (Bernard, 2008) szálerősítésű löttbetonokkal, amelyeket ASTM C1550 (Centrally Loaded Round Panel) jelű irányelv szerint vizsgált. Az irányelv alapján 3 ponton alátámasztott kör alakú, szálerősítésű löttbeton paneleket kell eltörni majd 40 mm-es lehajlásig terhelni és az ehhez szükséges energiát mérni J-ban (hasonló az  $R_{e3}$  értékhez). A paneleket különböző korban vizsgálta és azt figyelte meg, hogy magasabb beton szilárdsági osztályoknál az acélszál erősítésű betonok duktilitása csökken, míg a szintetikus szálaké nő (4. ábra). Ezt a szálak kihúzódnak mechanikájával magyarázta: míg a kihúzódnak szálak sok energiát abszorbeálnak, addig a betonba belekötött szálak nem kihúzódnak, hanem

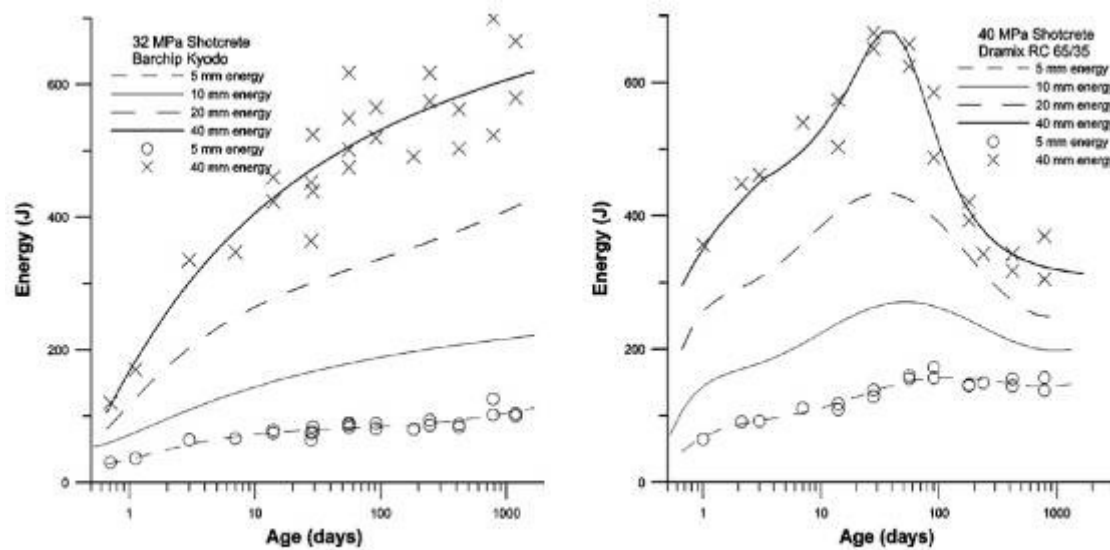


szakadnak, ami a duktilitást csökkenti (5. ábra). Ezt a kötést az acélszálak és a beton között idővel létrejövő kémiai kötésnek tulajdonítja.

A fentiek alapján a következő megállapítások tehetők:

- a szálerősítésű beton, mint kompozit anyag kúszását az alkotó anyagok kúszása mellett a szálak betonból való kihúzódnása is okozza,
- a szálak kihúzódnási képességének csökkenése, azaz a szálak a beton mátrixhoz való idővel történő erősebb tapadása a szálerősítésű beton, mint kompozit anyag duktilitásának csökkenését idézi elő.

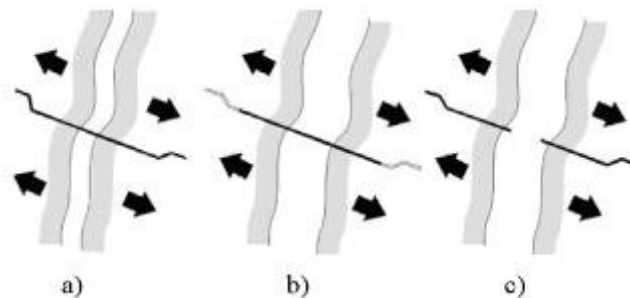
A szál és a mátrix kapcsolata az előzőek alapján kényes pontja az anyag időhöz kötött tulajdonságainak tekintetében: kis tapadás esetén nagyobb lesz a kúszás, nagy tapadás esetén pedig a duktilitás fog csökkenni. Ezeknek a jelenségeknek a tisztázására jelenleg is folynak kutatások.



a) szintetikus

b) acélszál erősítésű

4. ábra: duktilitás változása az idővel (Bernard, 2008)



5. ábra: szálak mechanikája (Bernard, 2008)

a) kezdeti repedés b) kihúzódnás – magas duktilitás c) szálak szakadása – alacsony duktilitás



## 5. Vizsgálati módszerek

A szálerősítésű beton paraméterei között az anyag egy hagyományos vizsgálatoknál kevésbé fontos, új paraméterét kell vizsgálnunk: az anyag repedés utáni törési energiáját, azaz a szálak repedés utáni hatását. Ennek a törés utáni feszültségnek kimérésére csak útvezérelt laboratóriumi eszköz alkalmas. A kísérlet során mérjük a terhelő erőt, illetve az alábbiak közül legalább egyet: elmozdulás, nyúlás vagy repedéstágasság. A kísérletekből az anyag feszültség-megnyúlás, illetve feszültség-repedéstágasság diagramjára következtethetünk.

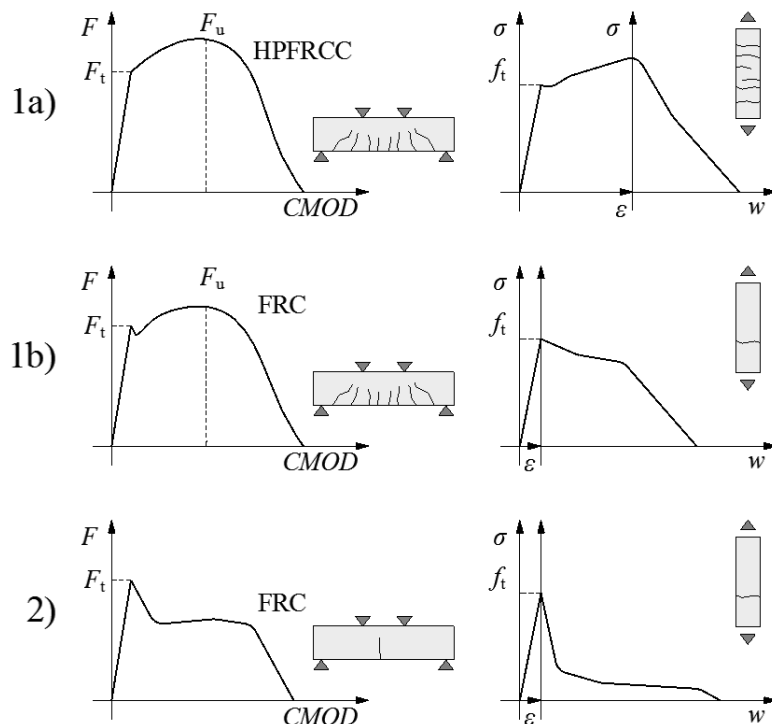
A szálerősítésű betonoknál a szál típusától és adagolásától függően a következő eredményeket kaphatjuk (Naam, 2008) (6. ábra):

1) erő-CMOD diagramnál törés utáni felkeményedő

1a) feszültség-repedéstágasság diagram húzófeszültség után emelkedő (HPFRCC, tensile strain hardening)

1b) feszültség-repedéstágasság diagram húzófeszültség után csökkenő (DHRCC, deflection hardening)

2) erő-CMOD diagramnál törés után lágyuló, feszültség-repedéstágasság diagramnál húzófeszültség után csökkenő (deflection-softening).



6. ábra: szálerősítésű betonok csoportosítása hajlítási és húzási viselkedés szerint



A beton hajlítási törésekor a szélső szálban a beton feszültsége már a húzófeszültségi diagram eső ágán van, azaz a ténylegesen mért törőerőhöz nem a lineáris feszültségeloszlás tartozik (Juhász, 2013, b). Erre még további hatással van a size-effect is, azaz különböző méretű elemeken végzett kísérleteknél más-más húzófeszültséget kapunk ugyanannál a betonnál is. Azonos méretű teszterendákon vizsgálva ezt a hatást nem kell számításba vennünk. Ha az erő-CMOD diagram a törés után emelkedő, akkor ezen belül még két típusa lehet: a feszültség-repedéstágasság diagram eső ága lehet továbbra is eső (1b), illetve magas adagolásnál akár emelkedő is lehet (1a). A 2) típusú teszteredményeknél az erő-CMOD diagram a törőerő után esik, ebben az esetben a feszültség-repedéstágasság diagram a húzófeszültség után mindenképp esik. Mivel a szintetikus szálak alacsony rugalmassági modulusuk miatt csak nagyobb megnyúlásnál képesek az acélszálakkal megegyező feszültséget felvenni, így nagyobb repedéstágasságnál kezdenek dolgozni. Ebből kifolyólag a szintetikus szálak mindig a 2) kategóriába esnek. Ennek tükrében a kísérleteknél csak ezt a típust kell figyelembe vennünk.

Mindles (Mindles et. al, 2003) szerint a szálerősítésű beton szívósságának vagy törés utáni maradó feszültségének kimérése során a teszteljárásnak a következő feltételeknek kell megfelelnie:

- (1) a teszteredményeknek olyan fizikai tartalma kell hogy legyen, amely egyrészt könnyen érthető, másrészt mértékadó tud lenni a szálerősítésű beton jellemzésénél vagy minőségellenőrzésénél;
- (2) a mérés végpontjának, amellyel a szívósságot jellemezzük, tükröznie kell a az adott szerkezet várható használati igénybevételeit;
- (3) az eredmények szórásának elfogadhatóan alacsonynak kell lennie, hogy mind a keverékek, mind a laboratóriumi pontosságok közötti eltéréseket kiküszöböljék;
- (4) számszerűsíteni kell tudnia a szálerősítésű beton legalább egy fontos tulajdonságát, úgymint szilárdság, szívósság vagy repedéscsökkentés, továbbá tükröznie kell a terhelés-elmozdulás görbe karakterisztikáját;
- (5) amennyire lehet függetlennek kell lennie a próbaelem méretétől és geometriájától.

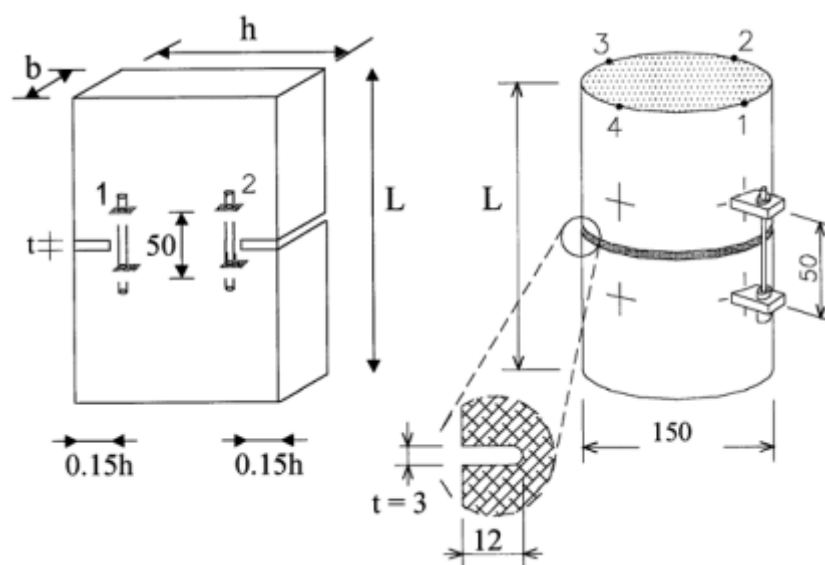


Fontos megjegyezni, hogy a ma alkalmazott tesztelési eljárások egyike sem felel meg a fent felsorolt összes feltételnek (Bentur és Mindles, 2007). Vegyük sorra a betonnál használt tesztelési eljárásokat és vizsgáljuk meg, hogy szálerősítésű betonnál is alkalmazhatóak-e.

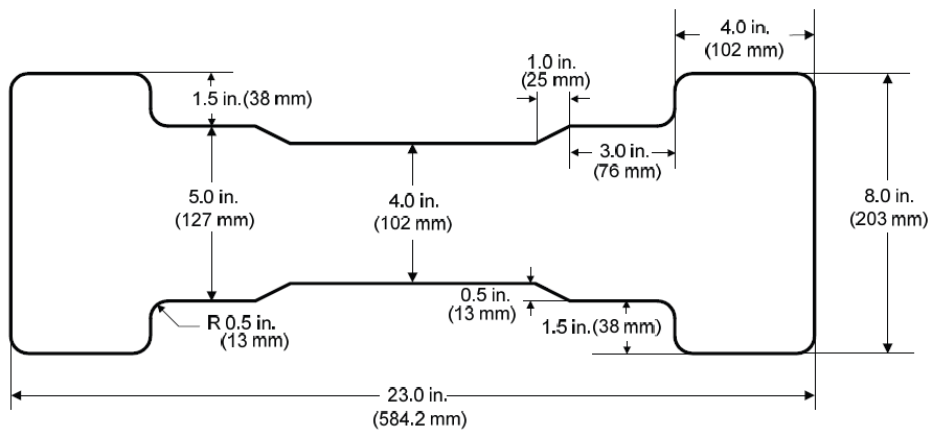
### Húzóvizsgálat

A húzóvizsgálat az egyik legkézenfekvőbb vizsgálati módszer a betonok rugalmassági modulusának, húzófeszültségének és repedés utáni törési energiájának kimérésére, amennyiben útvezérelt terhelést alkalmazunk. A tesztelési eljárással egyértelműen megállapítható, hogy húzófeszültség elérése után felkeményedő vagy lágyuló szálerősítésű betonnál van-e szó. A kísérlet korrekt elvégzése azonban nagyon nehézkes. Henger vagy négyzetes alakú próbatest középső részén bemetszést készítenek, egyik végén rögzítenek, a másik végén pedig megadott, általában 0,5 mm/perc sebességgel húznak. A terhelés során mérik a húzóerőt, elmozdulást és a bemetszés környezetének megnyúlását, illetve repedéstágasságát. Ezeknél a direkt húzókísérleteknél a húzás központossága alapvető fontosságú, amely ebben az esetben a repedések véletlenszerű megjelenése miatt nehezen biztosítható (7. ábra). Bonyolultabb, piskóta alakú próbalemezekkel (double dog-bone geometry) és befogással ez a nyomaték kiküszöbölhető (8. és 9. ábra). Iparban keveset használják nehéz kivitelezhetősége miatt.

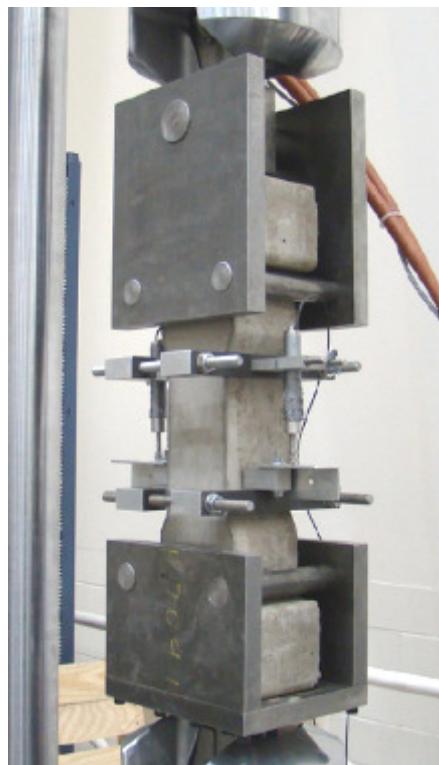
Teszt előírások: UNI 11039



7. ábra: bemetszett tesztelemek húzóvizsgálathoz



**8. ábra:** próbaelem alakja (Shih-Ho et. al, 2008)



**9. ábra:** direkt húzóvizsgálat a nyomatékok kiküszöbölésével (Shih-Ho et. al, 2008)

### Gerendateszt

A húzó-hajlító szilárdság és a törés utáni maradó feszültség meghatározásának egyik legelterjedtebb módja. Alapjában véve egy téglalap keresztmetszetű kéttámaszú gerendát hajlítunk felezőpontban vagy harmadoló pontokban terhelve 0,5 mm/perc sebességgel és





mérjük a terhelő erőt, középponti lehajlást és/vagy repedés tágasság növekedését (CMOD).

Alapjában véve három fő típusa van:

- 1) harmadpontos (vagy négy pontos), bemetszés nélkül;
- 2) harmadpontos (vagy négy pontos), bemetszéssel (CMOD mérés lehetősége);
- 3) felezőpontos (vagy három pontos), bemetszéssel (CMOD mérési lehetőség).

Harmadpontos gerenda kísérletnél a két terhelő erő közötti szakaszon a nyomaték állandó, ugyanakkor nyírásmentes. A gerenda ott fog megrepedni, ahol ezen a szakaszon a beton a leggyengébb, ha nincs bemetszés rajta.

Felezőpontos gerenda kísérletnél a terhelőfej alatt a legnagyobb a nyomaték, a gerenda feltételezhetően itt fog megrepedni. Ez azonban nem biztosított, hiszen egy gyengébb keresztmetszetben kisebb nyomatéknál is megrepedhet a gerenda, amely teszt ez után nem lenne egyértelműen értelmezhető. Emiatt a felezőpontos gerenda teszteket középen minden esetben bemetszik, gyengítve így a keresztmetszetet. A bemetszés másik fontos szerepe a CMOD mérés lehetősége.

CMOD legfőbb előnye, hogy közvetlenül a kialakuló repedést méri, míg az erő-lehajlás mérése esetében a gerenda középső, felső élének a gerenda középtengelyéhez viszonyított relatív elmozdulását kell mérni (10. és 11. ábra). Ennek a mérési elrendezésnek a segítségével ki tudjuk szűrni a támaszoknál és teher átadási pontnál kialakuló helyi alakváltozásokat, amelyek kis alakváltozásoknál nagyságrenddel nagyobbak tudnak lenni a gerenda görbületéből származó alakváltozásoknál, így a mérés pontosságát nagyban befolyásolják.

A gerenda tesztek legfőbb hátránya a magas szórásuk: ~20%, amik nagyon megnehezítik a karakterisztikus értékek előállítását. Ennek legfőbb okának a repedések véletlenszerűségét jelölik meg (Bernard, 2002), illetve a nem egyenletes száleloszlást (Dupont és Vandewalle, 2004).

Teszt előírások:

ASTM C 78 - 4 pontos hajlítási teszt - third-point loading

ASTM C 1609 - 4 pontos hajlítási teszt szálerősítésű betonokhoz

ASTM C 293 - 3 pontos hajlítási teszt - center-point loading

BS 1881: part 118 : 1983

DIN 1048

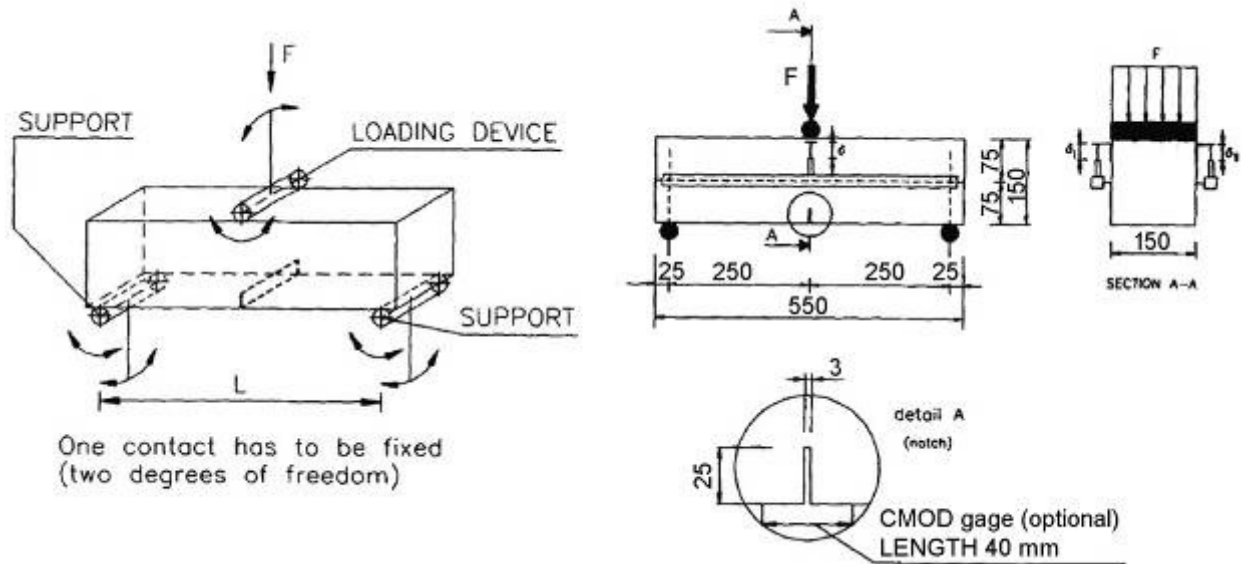
EN 14651:2005



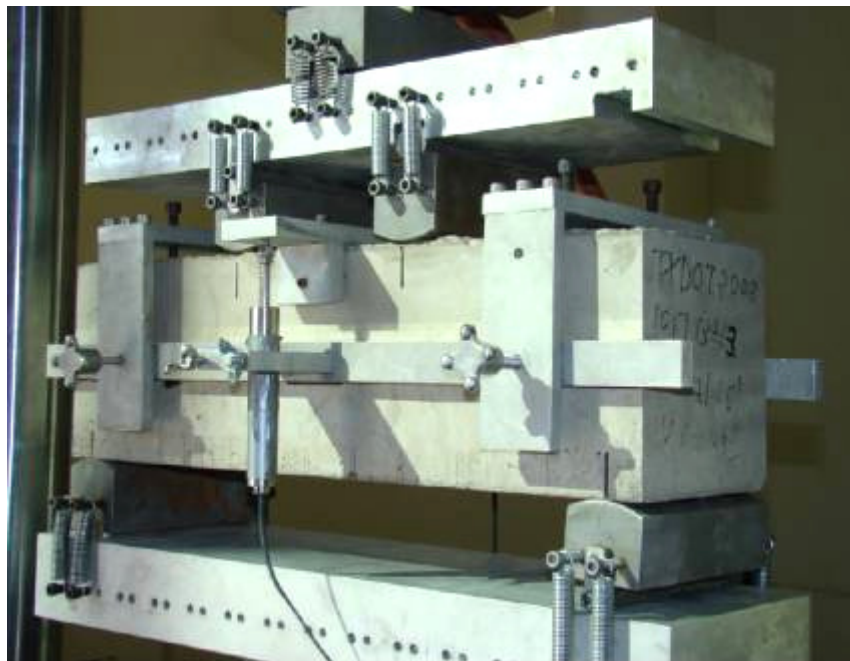
MSZ EN 12390-5:2009

RILEM TC162

UNI 11188 - 3 pontos bemetszett és 4 pontos teszt



10. ábra: 3 pontos gerenda teszt előírása a RILEM TC162 szerint



11. ábra: 4 pontos gerenda teszt (Shih-Ho et. al, 2008)



## Panel teszt

Panel tesztek esetében négy oldalán felfekvő négyzet alakú 600x600 mm-es panelről, illetve 3 ponton felfekvő kör alakú 800 mm-es átmérőjű panelekről beszélhetünk, de méretük tekintetében lehetnek különbözőek. Leginkább szálerősítésű löttbetonok tesztelésére használják, de lemezszerű építőelemek tesztelésére is alkalmas (pl.: talajon fekvő lemez, ipari padló). A teszt lényege, hogy a feltámasztott panelt közepén egy pontszerű erővel terhelik 4 mm/perc sebességgel, majd 5 (használatossági) illetve 40 mm-es (teherbírási) lehajlásig méri az erő-elmozdulás diagramot. Ezen erő-elmozdulás görbe alatti területet Joule-ban megadva jellemzik a szálerősítésű betont, amelyet szálerősítésű löttbeton alagutak egyszerűsített tervezéséhez tudnak felhasználni (Grimstad, et. al 2002). A teszt nagy előnye az, hogy a berepedt felület nagyobb, mint a gerendánál, így a teszteredmények szórása kisebb: 5-13%, illetve a repedések és a repedés kép az esetek nagy többségében ugyanaz (Bernard, 2002). Előnyei mellett néhány hátránya is van. Talán a legnagyobb, hogy jelenleg még nem létezik eljárás a teszteredmények anyagmodellhez való felhasználására, de folyamatos kutatások folynak róla (Vandewalle, et. al. 2008). A paneleket kézzel laboratóriumban nem lehet mozgatni nagy súlyuk miatt, illetve méretük miatt nem férnek be az átlagos anyagvizsgáló gépekbe, ezért általában speciális, erre a célra készített anyagvizsgáló gépekkel vizsgálják (12. ábra).

Érdekes megállapításra jutottak különböző kutatók: míg Shih-Ho és társai húzófeszültség lágyuló szálerősítésű betonja gerendatesztnél és paneltesztnél is hajlításra felkeményedett (Chao et. al, 2011), addig Xu és társai által készített teszteknel, hasonlóan feszültség lágyuló szálerősítésű beton esetében csak a gerendatesztben mutatkozott hajlításra felkeményedés, panel teszt esetében csak alig, igaz az ő paneljük mérete 80%-al kisebb volt a szabványosítottnál (Xu et. al, 2004). Ebből az a következtetés vonható le, hogy a tesztelési eljárások érzékenyek a tesztelt elem méretére, azaz méretfüggőek.

Teszt előírások:

ASTM C1550

DIN 18551



**12. ábra:** kör alakú panel teszt ASTM C1550 szerint (a szerző felvétele)

### **Hasító vizsgálat**

A hasító vizsgálat lényege, hogy egy henger alakú próbatestet a palástja mentén a két ellenkező oldalon vonalszerű erővel terhelünk, majd maximum értéket mérjük (13. ábra). A töréskor feltételezett feszültség elrendeződés alapján a húzófeszültség becsülhető. Mivel a kísérlet általában erővezérelt, ezért szálerősítésű betonokhoz nem alkalmas.

Teszt előírások:

MSZ EN 12390-6:2010

ASTM C 496 - hasító vizsgálat - splitting tensile strength test

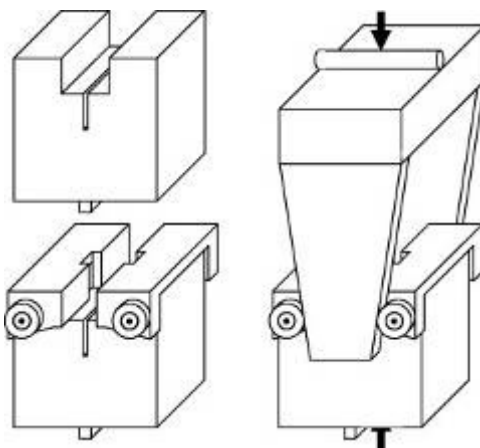
IS : 5816-1970



**13. ábra:** hasító vizsgálat (<http://www.geotechdata.info/geotest/brazilian-test.html>)

### Wedge splitting teszt

Iparban kevésbé használatos, de kutatásban elterjedt kísérleti módszer, amely lényegében gerenda hajlítási teszthez hasonlít (14. ábra). Mivel az eljárás elsősorban törésmechanikai tesztek elvégzésére hivatott, így teljesen megfelel szálerősítésű beton vizsgálatára. Előnye, hogy a kísérleti elemek kicsik, így praktikusán több elemet lehet készíteni ugyanannyi alapanyagból. Hátránya, hogy a tesztelem bonyolult, sok előkészítő munkát igényel.



**14. ábra:** wedge splitting test kialakítása

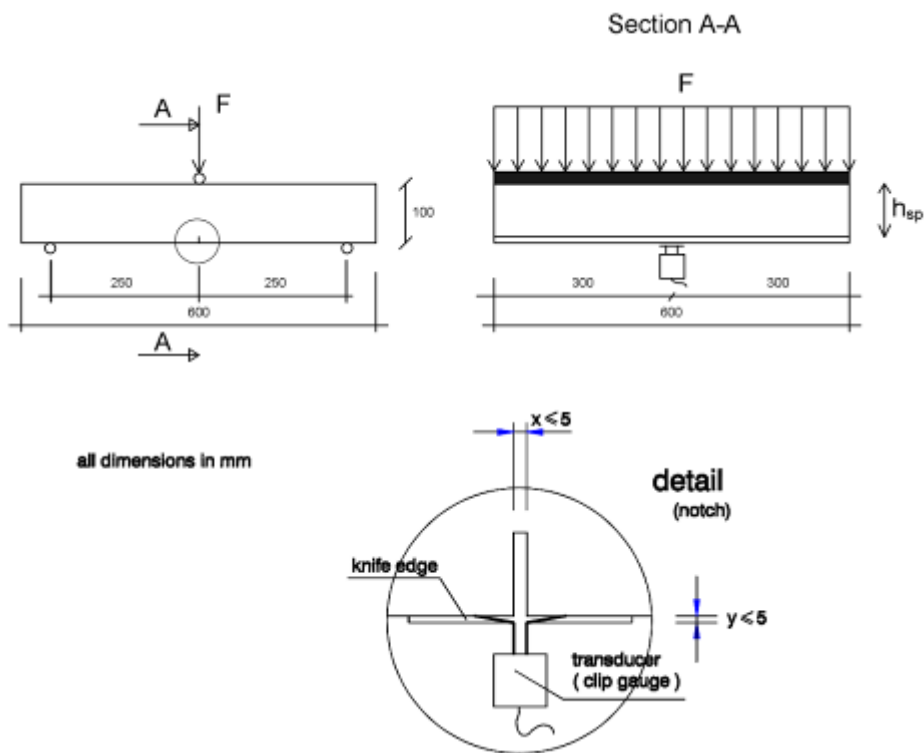


### EFNARC 3 pontos négyzetes panel hajlítási teszt

Szálerősítésű lőttbeton elemek tesztelésére szolgáló újszerű tesztelési eljárás (EFNARC, 2011). Az eljárás megpróbálja ötvözni a gerenda és panel teszt előnyeit, azaz:

- szálerősítésű beton elemnek legyen minél nagyobb a törési felülete (mint panel tesztnél, alacsony szórású eredmények);
- a repedés legyen irányított (CMOD mérési lehetőség);
- az eredményekből egyértelműen következtetni lehessen anyagi paraméterekre;
- egyszerű inverz analízis legyen végezhető.

A vizsgálat elrendezése a 15. ábrán látható. A vizsgálat előírása módszert is ad a kapott eredmények feszültségekké való konvertálására.



**15. ábra:** EFNARC négyzetes panel teszt, középső bevágással és CMOD méréssel



## 6. Saját kutatási eredmények - A Nagy Törés 2012

A BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék Laborjában a hazai forgalmazású szintetikus mikro és makro szálakat vizsgáltunk „A Nagy Törés” elnevezésű vizsgálat keretében. A kísérlet célja az volt, hogy bemutassuk a hazai forgalomban levő szálak teljesítményét a kivitelezésben és tervezésben jobban elfogadott acél szálak teljesítményével összevetve, továbbá a mikro és makro szálak közötti különbségek szemléltetése. Ennek elérése céljából minden gerenda azonos betontól készült, azonos keveréssel és tárolással és azonos időpontban, 28 napos korban lettek eltörve. Ezzel az összehasonlításhoz megfelelő alapot teremtünk, a szálak egymáshoz viszonyított teljesítményéről (húzószilárdságra gyakorolt hatás, maradó feszültség értéke) valós képet kapunk.

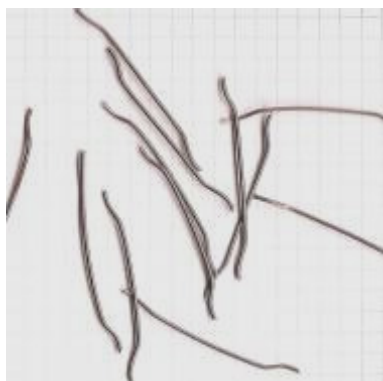
A kísérletben felhasznált szálak típusai az 2. táblázatban szerepelnek, 16. ábrán pedig a fényképek láthatóak. Az alkalmazott beton összetétele és tulajdonságai a 3. táblázatban, a szemeloszlási görbe a 17. ábrán látható.

| Szál neve                        | ACÉL1<br>HUMIX50 | ACÉL2<br>HUMIX60 | MAKRO1<br>EPC BC48 | MAKRO2<br>FortaFerro     | MAKRO3<br>Propex<br>Enduro HPP | MAKRO4<br>Kaposplast      |
|----------------------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Anyaga                           | acél             | acél             | polipropilén       | polipropilén             | polipropilén                   | polipropilén              |
| Alakja                           | kampós<br>végű   | kampós<br>végű   | dombor-<br>nyomott | csavart és<br>fibrillált | hullámos                       | hullámos                  |
| Kereszt-<br>metszet              | kör              | kör              | ovális             | -                        | lekerekített<br>négyyszög      | lekerekített<br>négyyszög |
| Átmérő [mm]                      | 1,1              | 0,9              | 0,5x1,3            | -                        | 0,7x1,3                        | 0,9x1,2                   |
| Szálhossz                        | 50               | 60               | 48                 | 50                       | 45                             | 40                        |
| Adagolás<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 20 és 40         | 20 és 40         | 5                  | 5                        | 5                              | 5                         |

| Szál neve                        | MAKRO5<br>Mapei ST48      | MAKRO6<br>Mapei ST24      | MIKRO1<br>High Grade | MIKRO2<br>Forta Net | MIKRO3<br>Forta<br>Econo-mono |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------|
| Anyaga                           | polipropilén              | polipropilén              | poliolefin           | polipropilén        | polipropilén                  |
| Alakja                           | hullámos                  | hullámos                  | fibrillált           | fibrillált          | mono                          |
| Kereszt-<br>metszet              | lekerekített<br>négyyszög | lekerekített<br>négyyszög | -                    | -                   | -                             |
| Átmérő [mm]                      | 0,8x1,1                   | 0,7x1,2                   | -                    | -                   | -                             |
| Szálhossz                        | 48                        | 24                        | 19                   | 19                  | 10                            |
| Adagolás<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 5                         | 5                         | 1                    | 1                   | 1                             |

**2. táblázat:** a vizsgált szálerősítések tulajdonságai





ACÉL 1  
HUMIX 50



ACÉL 2  
HUMIX 60



MAKRO1  
EPC BARCHIP 48



MAKRO2  
Forta Ferro



MAKRO3  
Propex Enduro HPP



MAKRO4  
Kaposplast



MAKRO5  
Mapei ST48



MAKRO6  
Mapei ST24



MIKRO1  
Brug Contec High Grade





MIKRO2  
Forta Net

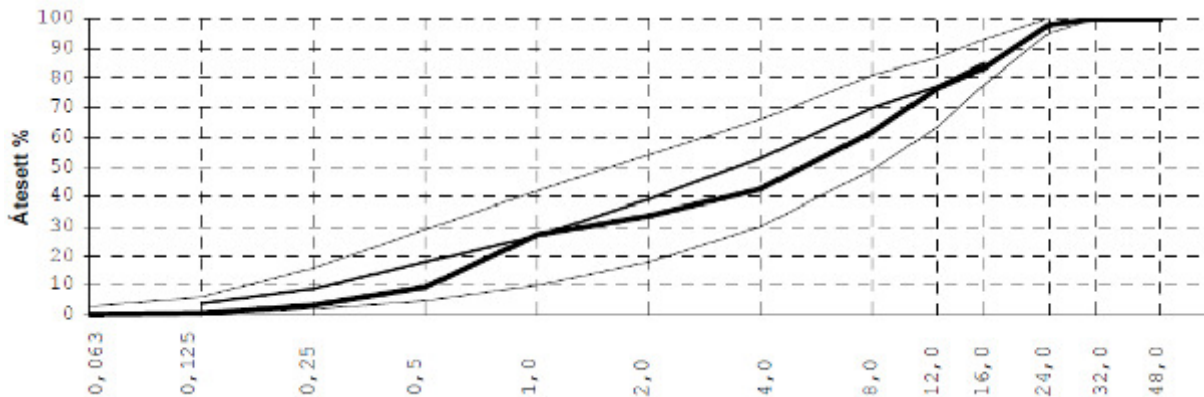


MIKRO3  
Forta Econo-Mono

**16. ábra:** a szálak fényképei

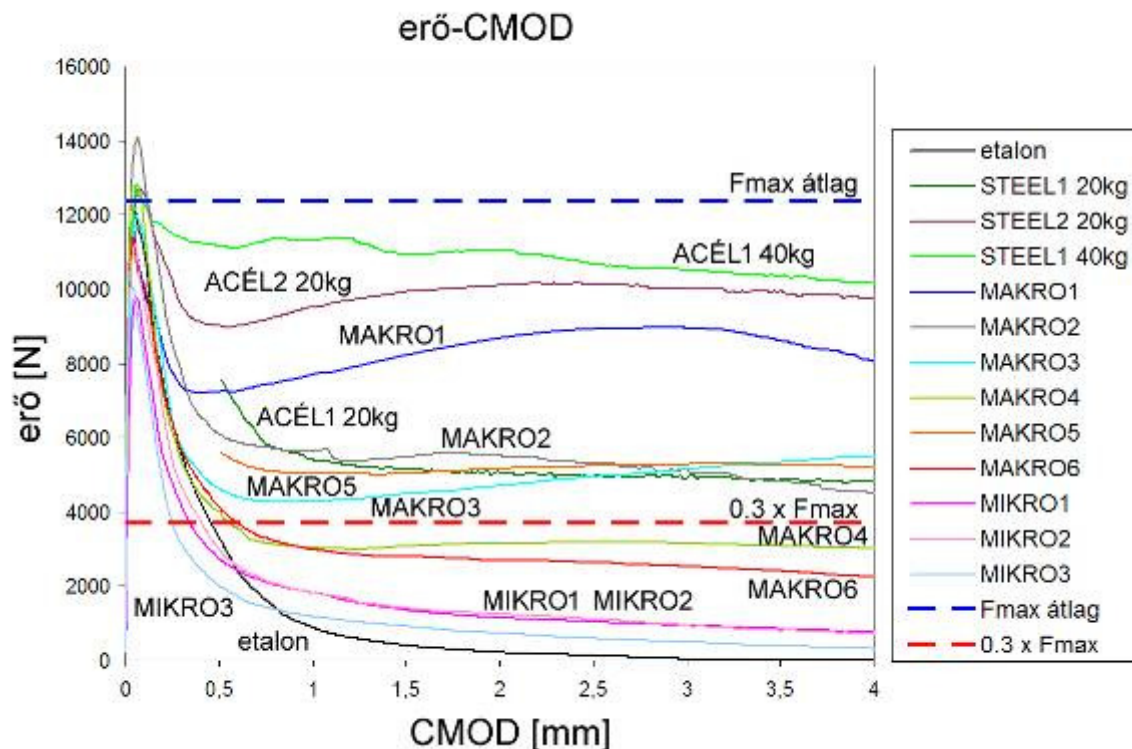
| C30/37- XC4-XD2-XF1-XA1-XV2(H)-24-F3 |                        | %    | Térfogat l/m <sup>3</sup> | Tömeg kg/m <sup>3</sup> |
|--------------------------------------|------------------------|------|---------------------------|-------------------------|
| Cement                               | CEM II/A-S 42,5 Holcim |      | 105                       | <b>325</b>              |
| Víz                                  |                        |      | 160                       | <b>160</b>              |
| v/c                                  | <b>0,492</b>           |      |                           |                         |
| Adalékanyag                          | OH 0-4                 | 42   | 302                       | <b>799</b>              |
|                                      | OK 4-8                 | 28   | 130                       | <b>342</b>              |
|                                      | OK 8-16                | 22   | 158                       | <b>418</b>              |
|                                      | OK 16-24               | 18   | 130                       | <b>342</b>              |
|                                      | összesen               | 100  | 720                       | 1901                    |
| Finomrész                            | 0,25 mm alatti rész    | 3,41 |                           | 65                      |
|                                      | cement                 |      |                           | 325                     |
|                                      | összesen               |      |                           | <b>390</b>              |
| Péptartalom                          | víztartalom            |      |                           | 160                     |
|                                      | cement tartalom        |      |                           | 105                     |
|                                      | összesen               |      |                           | 265                     |
|                                      | pépigény               |      |                           | 224 (+40)               |
| Levegőtartalom                       |                        | 1,50 | 15                        |                         |
| Adalékszer                           | Mapei Dynamon SR3      | 0,40 | 1,21                      | 1,30                    |
| Frissbeton                           |                        |      | 1000                      | <b>2388</b>             |

**3. táblázat:** a beton összetétele és tulajdonságai



17. ábra: szemeloszlási görbe

Az elkészült gerendákat a RILEM TC162 irányelv alapján 3 pontos terheléssel eltörtük (Vandewalle, et. al, 2002), mértük az erőt, középponti elmozdulást és a repedéstágasságot (CMOD). Az összesített eredményeket a 18. ábrán láthatjuk.

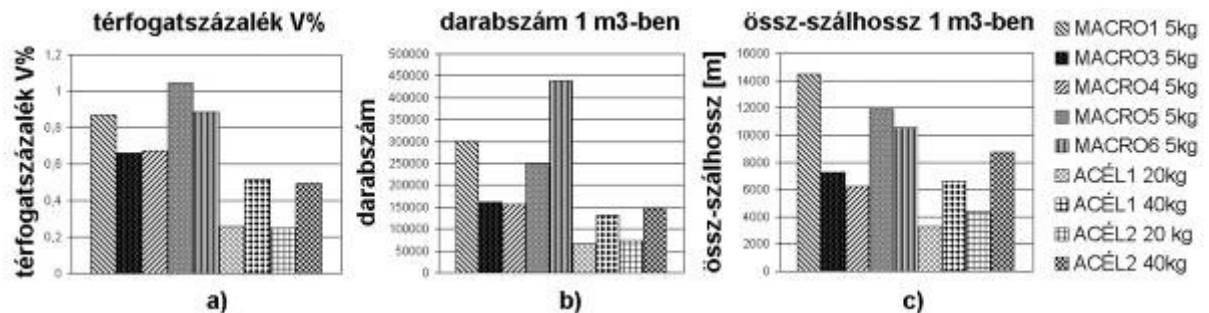


18. ábra: összesített erő-CMOD eredmények

A hozzáadott szálak mennyiségének jellemzésére az  $1 \text{ m}^3$  betonba kevert szálak súlyát adják meg kg-ban ( $\text{kg/m}^3$ ). Míg az acél fajsúlyát állandónak vehetjük, így ezzel a módszerrel kétféle acélszál könnyen összehasonlítható, addig a műanyag szálak fajsúlyában jelentős



eltérés lehet. Acél- és műnyagszál összehasonlítása ezen az alapon ugyancsak nehézkes. Sokkal korrektebb az összehasonlítás, ha a térfogatszázalékot,  $1 \text{ m}^3$  betonban található szál darabszámot vagy összszálhosszat vizsgáljuk (19. ábra).

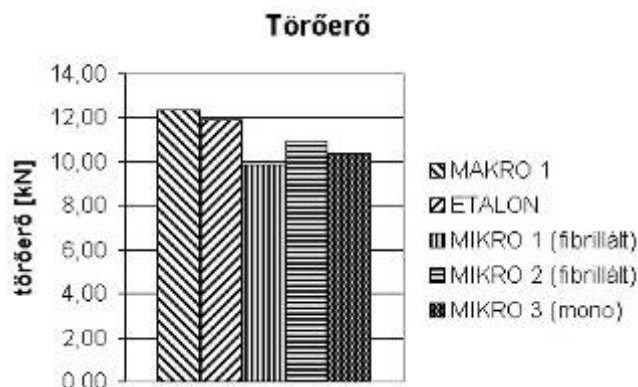


**19. ábra:** szálerősítés mennyisége különböző értékekben mérve  
a) térfogatszázalékban b) szálak darabszámában c) szálak összhosszában

A szintetikus szálak esetében az adagolás minden száltípusnál  $5 \text{ kg/m}^3$  volt, ennek ellenére az erő-CMOD diagramokban lényeges eltérések adódtak. Ha az  $1 \text{ m}^3$ -hez adott szálak térfogatszázalékát, darabszámát vagy összhosszát vizsgáljuk, ugyancsak jelentős eltéréseket találhatunk. Mindezekből az következik, hogy nem hasonlítható össze egyértelműen kizárólag az adagolással két makroszál, azaz **vizsgálat nélkül nem helyettesíthető egyik típus a másikkal!**

A 18. ábrából egyértelműen kitűnik és igazolódik az állításunk a mikro szálakra vonatkozóan: statikai hatásuk elhanyagolhatóan kicsi repedés után. Előnyük a mikro repedések kialakulásának meggátolásában keresendő. Ezekre külön vizsgálatot nem végeztünk, meghatározásuk nehezen számszerűsíthető, habár az osztrák irányelv ad rá útmutatást (ÖVBB, 2008).

Azzal a gondolatmenettel élve, hogy minden makro repedés egy mikro repedésből indul, feltételezhetjük, hogy a mikro szálaknak mégis van statikai hatásuk, mégpedig a hajlító-húzószilárdság növelésében. Azonban ezt az elméleti feltevést nem támasztják alá a kísérleti eredmények, sőt: a fibrillált mikroszálaknál egyenesen csökkent a törőteher, azaz a húzó-hajlító szilárdság az etalon, szálerősítés nélküli betonhoz képest (20. ábra)!



**20. ábra:** húzó-hajlítószilárdságok alakulása a száltípusok alkalmazásának függvényében

## 7. Szálak adagolásának hatása a betontervezésre

A szálak betonba való keverése során változik a beton pépigénye, konzisztenciája. A szálhossz és az adalékanyag maximális szemcse nagyságának megfelelő megválasztása esetén a szálak elkeveredése homogénebb a betonban. Öntömörödő és nagyszilárdságú betonok esetében ezen értékek pontos beállítása még fontosabb feladat. Ezeket a tervezési paramétereket vesszük sorra.

### Pépigény

Betontechnológiai szempontból a szálak adagolása nagy hatással lehet a beton konzisztenciájára. Gyártói/forgalmazói oldalról jól hangzó szlogen, hogy a szálakat egyszerűen csak keverjük hozzá a betonhoz, nincs szükség a betonkeverék módosítására. Hasonlítsunk össze hasonló teljesítőképességű acél és szintetikus szálerősítésű betonba kevert szálakat tömeg és térfogatszázalékuk alapján:

| Acél                 | Szintetikus             |
|----------------------|-------------------------|
| 30 kg/m <sup>3</sup> | 5 kg/m <sup>3</sup>     |
| 0,387 v%             | 0,867 v% (2,24-szerese) |

Összevetve az értékeket a szintetikus szál térfogatszázaléka több mint kétszer akkora, mint a hasonló teljesítményt adó acélszál adagolásnak. Ez betontechnológiailag annyit jelent, hogy kétszer annyi felületet kell bevonni péppel. Ha a beton nem cementpép-túltelített, esetleg péphiányos, akkor a keveredés során vagy a szálakat, vagy az adalékanyagot nem fogja bevonni a cementpép, amik a konzisztencia és szilárdság romlását okozzák, továbbá az



elkészült szálerősítésű betonban a szálak és mátrix kapcsolata is gyengébb lesz. Tervezés során a szálak hozzáadott felületét figyelembe kell vennünk a péptartalom tervezésénél.

Magyari cikkében (Magyari, 1999) különböző anyagú szálerősítéseket vizsgált, majd megadta a szálerősítésű anyagok fajlagos felületéhez tartozó cementpép igényét is. Ebben a cikkben még nem foglalkozott szintetikus makro szálakkal, de hasonló kísérleti módszerrel meg lehet adni bármilyen szálhoz tartozó cementpép igényt is.

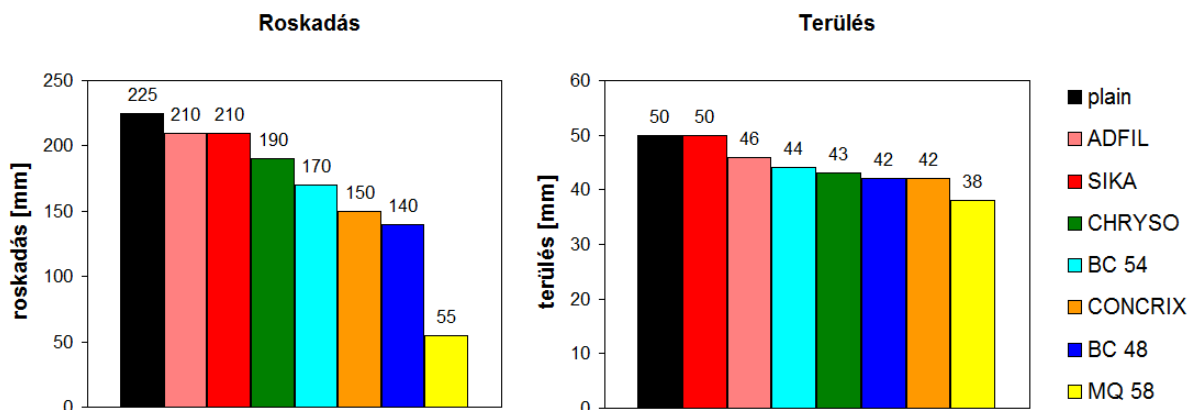
Saját kutatások alapján (Juhász, 2013, c) azt a következtetést vontam le, hogy a szintetikus szálak teljesítménye a cementhabarcsról való leválás és cementhabarcsból való kihúzódás függvénye. Ennek hatására nem csak a v/c tényező, hanem a cementhabarcs cement/homok aránya is nagy hatással van.

Összefoglalva a fenti megállapításokat és Magyari cikkében ajánlott tervezési módszert kiegészítve a következő ajánlásokat tehetjük:

- tervezés során betont és szálcementet kell terveznünk;
- a beton nem lehet péphiányos, inkább péptelített legyen;
- szálcementet úgy kell megterveznünk, hogy v/c tényezője azonos legyen a betonéval, továbbá képes legyen tökéletesen bevonni a szálak felületét cementpéppel;
- cement/homok arány csökkentésével romlik a szál teljesítőképessége.

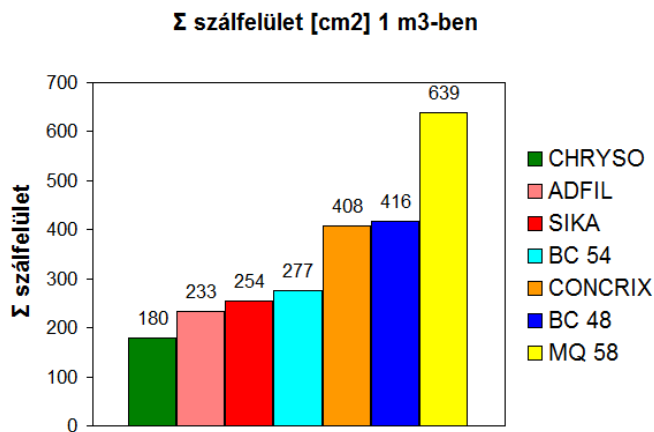
### **Konzisztencia változása**

Szálerősítésű betonok konzisztenciájának mérésére a szálerősítés nélküli betonhoz használt mérési módszereket használhatjuk, úgy mint terület és roskadás. Azonban ez az érték nagyságrendi különbséget adhat. A betonba kevert szálak trixotópiához hasonló jelenséget okoznak: vibráláskor a beton bedolgozhatósága nagyban javul, nélküle viszont a szálak nagyon összetartják a betont. A terület során leejtett ejtőasztal ezt a dinamikus hatást adja meg a szálerősítésű betonnak és jobb eredményt ad, mint a roskadás mérésnél, ahol ilyen dinamikus hatást nem kap a beton. Összehasonlításképp elvégeztünk terület és roskadás mérést is különböző szintetikus szálerősítésű betonoknál amely a 21. ábrán látható.



a: roskadás b: terülés  
**21. ábra:** roskadás és terülés értékei szálerősítésű és etalon betonnál

Mivel az összes szálerősítésű beton ugyanabból a keverékből készült, így a konzisztenciára leginkább a szálak felületén megtapadt cementpép lehetett hatással. A szálak átmérőjéből és össz-szálhosszból egy szála és adagolására jellemző felületet tudunk becsülni. Ez a becslés nem veszi figyelembe a szálak felületi bordázottságát, amely tovább növelheti a szál bevonandó felületét. A becsült szálfelület a 22. ábrán látható.



**22. ábra:** szálak felülete 1 m<sup>3</sup> betonban

A becsült szálfelület és a konzisztencia értékei között jól látható összefüggés van. A legnagyobb felülete az MQ 58 típusú szálnak van, amely roskadásnál és terülésnél is a legrosszabb eredményt adta. A legkisebb felülete a Chryso típusú szálnak van, amely harmadik, illetve negyedik helyen szerepel a konzisztencia mérésénél. Adfil és Sika típusú szálaknak van a legjobb értékük, amely a kis szálfelületükből is következhet. A mezőny közepén szerepel a BC54, Concris, majd a BC48, nagyjából ezen sorrendben vannak a



konzisztencia értékei is. Ezekből levonható az a következtetés, hogy a szálak felülete hatással van a konzisztenciára, méréssel kimutatható a pépigénye. Bár a konzisztencia elég fontos tulajdonsága a friss betonnak, a szálgyártók a keverésre vonatkozó információval nem szolgálnak.

### **Szemnagyság hatása**

Acélszálak esetén vannak ajánlások a szálhossz/átmérő arányhoz tartozó maximális szemnagyságra normál és szivattyúzott beton esetén, illetve maximális adagolásra különböző aránynál (Mathews, 1983). Ezen ajánlások abból indulnak ki, hogy az adalékanyag váznak alkalmasnak kell lennie a szálerősítésű anyag egyenletes befogadására (Magyari, 1999). Hajlékony szálak esetén ez kevésbé fontos, hiszen a szálak a keveredés során a kavicsok körül képesek meghajolni, igazodva azok méretéhez, kitöltve a rendelkezésre álló helyet. Szabályként azt is említik, hogy a szálerősítő anyag hossza legyen 4-5-szöröse a szemnagyságnak, amely egy  $d_{\max}=24$  mm-es betonnál 96-120 mm-t jelentene. Ilyen hosszú szálakat elkeverni nagyon bonyolult lenne, pedig ez a  $d_{\max}$  érték teljesen szokásos ipari padlók esetében. Szintetikus szálaknál ezt az arányt 2-re vehetjük.

### **Különleges betonok: önterülő szálerősítésű betonok**

Az önterülő betonok angol rövidítése: SCC (self-compacting concrete), míg az önterülő szálerősítésű betonok jele: SCFRC (self-compacting fiber-reinforced concrete). Az önterülő betonok a beton szakma legújabb vívmányai, melyek az iparban egyre több helyen kerülnek alkalmazásra számos előnyüknek köszönhetően. Néhány ilyen előnyük a következő:

- kevesebb bedolgozási idő, mivel nincs szükség vibrálásra,
- ezáltal tömörebb beton érhető el, még bonyolult vasalásnál is,
- szebb felületi kialakítás (látszóbetonoknál),
- alacsonyabb zajterhelés a kivitelezéskor.

Bonyolult zsaluzatok alkalmazásakor és látszóbeton felületeknél gyakran az egyetlen járható út az önterülő betonok használata. Leginkább önterülő acél szálerősítésű betonról találunk irodalmat (Grunewald és Walvaren, 2001), de újabban már szintetikus makroszálakkal is végeztek kutatásokat (Cornaldesi, Moriconi, 2011; Hossain K.M.A, et. al, 2013). Tesztelési eljárásról írt cikket Khayat és Roussel (Khayat és Roussel, 1999).



Szálerősítésű önterülő beton a két típus előnyeit kombinálja. A hozzáadott szál mennyisége közel egyenes arányos a repedés utáni maradó feszültséggel, ugyanakkor fordítottan a bedolgozhatósággal, emiatt a hozzáadott szál mennyisége kulcsfontosságú a szálerősítésű öntömörödő beton tervezésénél.

A következőkben Cornaldesi és Moriconi a Fiber Concrete 2013 konferencián, Prágában bemutatott cikkének az adatait közlöm. A beton keveréke a következő volt: CEM II/B-L 42.5 portland cementet használtak, amely fajlagos felületi értéke  $0,42 \text{ m}^2/\text{g}$  volt. Finomrészt mészkőliszttel növelték. Adalékanyagként 0-4 mm-es osztályozott kvarchomokot és 2-10 mm-es osztályozott zúzott kavicsot használtak. Ezek tömege rendre  $2610$  és  $2660 \text{ kg/m}^3$  volt. A v/c tényező  $0,55$  volt. 3 féle szálerősítést használtak, amelyeket az 4. táblázatban foglalok össze. A cikkben megjelent eredeti értékeket álló betűvel, a megjegyzéseimet dőlt betűvel jelölöm. A pontos betonkeverékeket az 5. táblázatban foglalom össze.

| Szál típusa                | Kampós végű acél                                                     | PVA (poli-vinil alkohol) szintetikus szál | Bikomponens szintetikus (Brugg Contec Concris)                                                                                                                  |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hossz (mm)                 | 30                                                                   | 12                                        | 50                                                                                                                                                              |
| Átmérő (mm)                | 0,7                                                                  | 0,2                                       | 0,5                                                                                                                                                             |
| Szálhossz/átmérő           | 43                                                                   | 62                                        | 100                                                                                                                                                             |
| Rugalmassági modulus (GPa) | 170<br>( <i>acél rugalmassági modulusa 210 GPa általánosságban</i> ) | 30                                        | 72<br>( <i>szintetikus szálak rugalmassági modulusa 3-10 GPa érték közötti, gyártó &lt;10 GPa értéket jelöl meg, itt a 72 GPa érték kicsit túlzónak tűnik</i> ) |
| Húzószilárdság (MPa)       | 450                                                                  | 1000                                      | 510                                                                                                                                                             |

**4. táblázat:** alkalmazott száltípusok





BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MÉRNÖKGEOLOGIA TANSZÉK

Tel: 463-4068 \* 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. \* Fax: 463-3450

| Keverék neve                  | Referencia | Acél | PVA<br>alacsony | PVA<br>magas | BIC<br>alacsony | BIC<br>magas |
|-------------------------------|------------|------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| v/c                           | 0.55       | 0.55 | 0.55            | 0.55         | 0.55            | 0.55         |
| Víz (kg)                      | 190        | 190  | 190             | 190          | 190             | 190          |
| Cement (kg)                   | 345        | 345  | 345             | 345          | 345             | 345          |
| Homok (kg)                    | 980        | 980  | 980             | 980          | 980             | 980          |
| Zúzott<br>adalékanyag<br>(kg) | 612        | 595  | 602             | 599          | 605             | 603          |
| Mészkőliszt<br>(kg)           | 180        | 180  | 180             | 180          | 180             | 180          |
| Száladagolás<br>(kg)          | 0          | 50   | 7.5             | 10           | 4.5             | 6            |
| Folyósító (kg)                | 6.3        | 6.3  | 6.3             | 6.3          | 6.3             | 6.3          |

**5. táblázat:** a beton összetétele

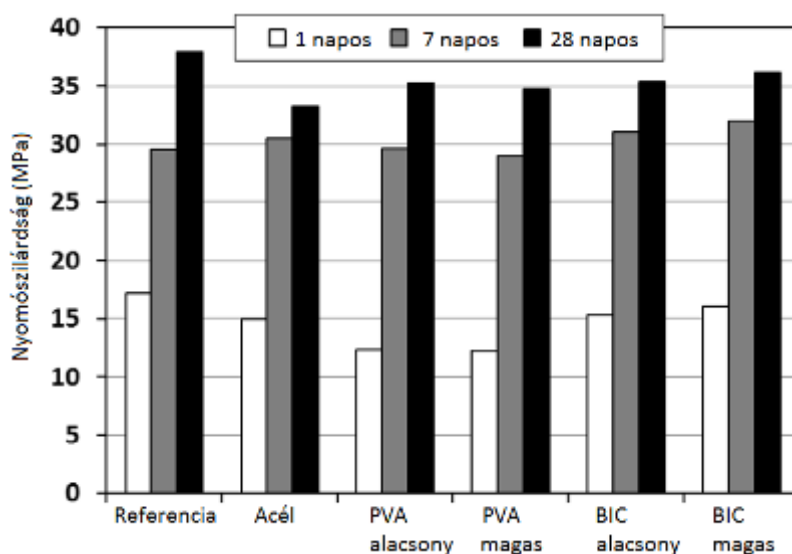
A referencia keverék roskadási területe 650-660 mm között volt. A szálak hozzáadásakor a szál térfogatának megfelelő mennyiségű zúzott kavicsot vettek ki a keverékből, ezáltal biztosítva, hogy a hozzáadott szálak ne okozzanak konzisztencia romlást. A konzisztencia mérések során az UNI 11041 és UNI 11042 olasz szabványok szerint jártak el, azaz megmérték a roskadási terület mérték határértékét, majd a területi időt (500 mm-es területi átmérő eléréséhez szükséges idő), végül a tölcséres kifolyási időt. Az eredményeket a 6. táblázatban láthatjuk.

| Keverék neve                                                 | Referencia | Acél | PVA<br>alacsony | PVA<br>magas | BIC<br>alacsony | BIC<br>magas |
|--------------------------------------------------------------|------------|------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| Roskadási<br>területi<br>mérték,<br>$\varnothing_{FIN}$ (mm) | 650        | 650  | 660             | 650          | 660             | 650          |
| Területi idő,<br>$t_{FIN}$ (s)                               | 14         | 13   | 12              | 13           | 12              | 13           |
| Tölcséres<br>kifolyási idő,<br>$t_{FIN}$ (s)                 | 10         | 9    | 9               | 10           | 10              | 11           |

**6. táblázat:** friss beton konzisztenciája



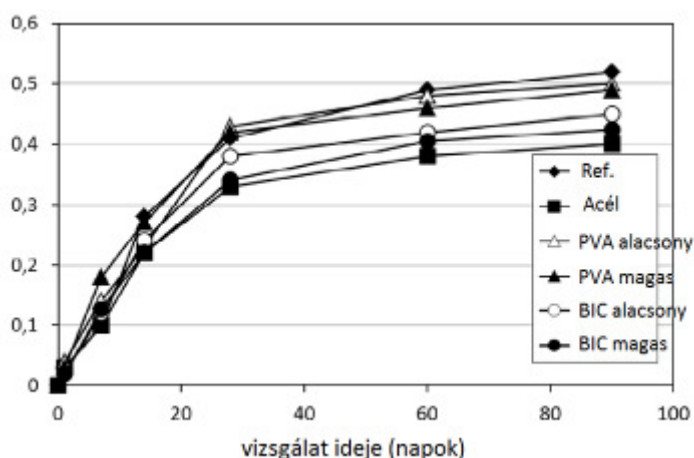
A betonok nyomószilárdságát 1, 7 és 28 napos korban is megmérték, ez a 23. ábrán látható. A szálerősítéssel készült betonok nyomószilárdsága minden esetben alacsonyabb volt, mint a referencia betoné. Ezt a szerzők azzal magyarázzák, hogy a hozzáadott vízmennyiségben enyhe különbség adódott: a szálerősített betonoknál kicsivel több vizet adtak hozzá az azonos konzisztencia elérése érdekében. A megcélzott C25/30-as szilárdsági kategóriát mindegyik keverék teljesítette, bár a különbségek így is jelentősek.



**23. ábra:** betonok nyomószilárdságának alakulása

A megszilárdult beton húzó-hajlítószilárdságát a RILEM TC 162-ben ajánlott gerendateszt alapján mérték ki, majd a törési energiát a RILEM TC50 (RILEM TC50, 1985) alapján határozták meg. A húzó-hajlítószilárdság a vártaknak megfelelően alakult: túl nagy különbség nem volt a referencia és a szálerősítésű beton értékei között. A törési energiák többszörösére növekedtek, viszont a hivatkozott irányelv beton törési energiájának a kimérésére hivatott, így ezen eredmények figyelembe vételétől eltekintek.

A szerzők végül kimérték a keverékek gátolatlan zsugorodását egy 100x100x500 mm-es gerendán az UNI 11307 előírásai alapján. A vizsgálat 90 napig tartott, amely eredményei a 24. ábrán láthatóak. Összefoglalva megállapítható, hogy a nagyobb rugalmassági modulusú szálak zsugorodás gátlása kedvezőbb volt, mint az alacsonyabbaké.



24. ábra: betonok gátolatlan zsugorodása

Összefoglalva az eredményeket kijelenthetjük, hogy a szintetikus makro szálakkal is lehet önterülő betont előállítani. A keverék tervezésénél a hozzáadott szálak térfogatával csökkenteni kell a kavicsváz térfogatát, ezzel biztosítva a péptelítettséget. Kiegészíteném ezt a megjegyzést azzal, hogy a szálak felülete is fontos, hiszen a pépnek ezt az extra felületet kell bevonnia. Így az én ajánlásom nem a kavicsoknak a szálak térfogatával való redukálása, hanem a *szálak összfelületével azonos felületű kavicsmennyiséggel* kell redukálni. Mivel a szálak bordázottsága és a kavicsok felülete nem egzaktul mérhető mennyiség, így ezt kísérlettel kell meghatározni.

#### Különleges betonok: nagyszilárdságú szintetikus szálerősítésű betonok

A nagyszilárdságú betonoknál a magas adagolású acél szálerősítés a nyomószilárdság növelésében is részt vesz, köszönhetően a beton kvázi térbeli feszültségi állapotának létrehozásával. Ezt olyan szál tudja, amely kis repedésnél is képes dolgozni, repedés után felkeményedés történik a feszültségeknél (lásd 6. ábra). Ilyenre szintetikus szálak nem képesek, még magas adagolásnál sem, köszönhetően a mátrixnál alacsony rugalmassági modulusuknak. Az alacsony rugalmassági modulusból következően a beton nyomószilárdsága is csökken, mivel egy puhább anyagot keverünk a mátrixba. Ez a hatás hasonló a légbuborékok nyomószilárdság csökkentő hatásához. Ez a nyomószilárdság csökkentő hatás nagyjából  $10 \text{ kg/m}^3$ -es adagolás felett érvényesül. Összefoglalva a fentieket: nagyszilárdságú betonoknál a szintetikus makro szálak alkalmazása kevés előnnyel jár, a beton nyomószilárdságát nem tudja növelni, magasabb adagolásnál pedig épp ellenkezőleg: csökkenti.



## 8. Hazai és nemzetközi példák szintetikus makro szálerősítések alkalmazására

Mivel a szintetikus szálerősítés alkalmazásai önmagában egy dolgozat anyaga lehetne, így a teljesség igénye nélkül a példák kiválasztása során törekedtem a legérdekesebb szerkezeteket bemutatni.

### Ipari padlók

Számos ipari padló készült idehaza és világszerte szintetikus makro szálerősítésű betonból. Fontos kiemelni, hogy statikai szerepe csak a szintetikus makro szálaknak van, mikro szálakkal kevert betonnál a szálak szerepe csak az esztétikai mikrorepedések meggátolása, túlterhelés esetén a szálak nem tudják a szerkezeti repedések kialakulását meggátolni.

Szálerősítésű ipari padlók irányelve a brit TR34-es ipari padló irányelv (The Concrete Society, 2003, 2013). A 2003-as kiadásban még a szálak hatásának jellemzésére szolgáló  $R_{e3}$  értékkel számoltak, de a 2013-as kiadásnál már CMOD értékekből következtet a maradó feszültség értékeire. Bár a beton ipari padlók repedezettségének legfőbb oka a korai és hosszabb távú zsugorodási repedésekben keresendő, az irányelv egy mondattal tér ki előre: miszerint megfelelő betontechnológiai tervezéssel a zsugorodási repedések kikerülhetők. Mivel a szálak a zsugorodásra is kedvező hatással vannak, azonban erre számszerű értékek nem állnak rendelkezésre, így nehezen vehetőek számításba, csak mintegy biztonsági tartalékként. Fontos azonban megjegyezni, hogy rosszul megtervezett ipari padló betonnál a szálak kedvező hatása nem tudja megoldani a zsugorodási problémákat.

A bemutatott példa egy Pápa mellett épített szarvasmarha hígtrágya tározó. A Barchip 48 szintetikus makroszálat a tározó aljzatlemezében használták, a hagyományos hálós vasalás teljes elhagyásával. A mezőgazdasági építményeknél a betonszerkezetekben alkalmazott szintetikus szálerősítés fő előnyei a vegyi hatásokkal szembeni ellenálló képessége (trágyalé), illetve a felületből kiálló szálak nem okozhatnak sérüléseket az állatoknak (kiálló acélszál megsebesítheti az állat lábát, esetleg az állat megeszi, amely súlyos problémákat okozhat). A kivitelezés során teljesen meg voltak elégedve a szálak felhasználásával, a felület lesimításával és utókezelésével. Az egyedüli nehézség a felület tökéletes lesimítása volt, hogy a szálak ne álljanak ki belőle. Ennek elérése érdekében jól kellett időzíteni a betonsimítógép



használatát: még a teljes szilárdulás előtt, de a beton meghúzása után kellett elvégezni. Ahol nem várták ki ezt az időt, ott a beton felületéből a szálak kiállnak, amely ebben az esetben csak esztétikai gondot okoz (25, 26. ábra).



**25. ábra:** az elkészült trágyatározó



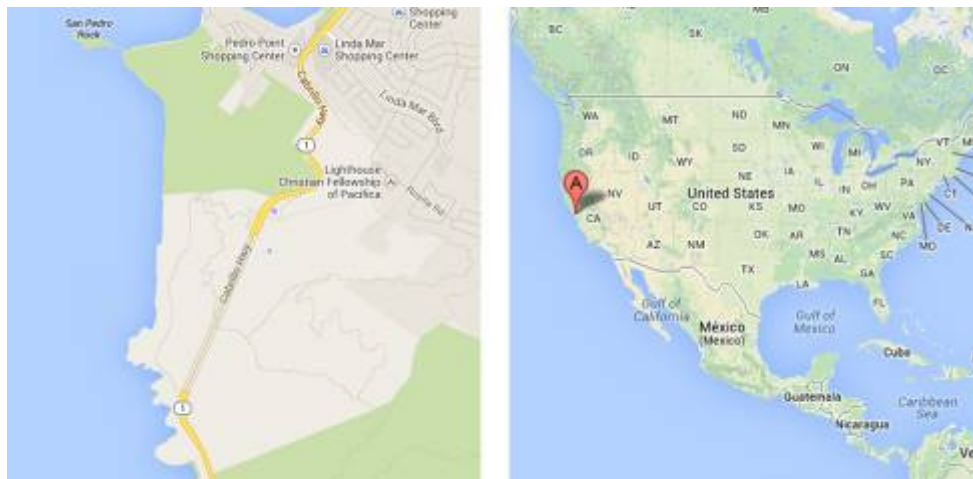
**26. ábra:** felületből kiálló szálak



## Lőttbeton szerkezetek

Alagútépítésben és bányászatban az egyik közkedvelt alagút építési módszer a lőttbeton (shotcrete) alagútfal kialakítás. Lőttbetont alkalmazhatják állandó és ideiglenes alagutaknál is. Szálerősítésű lőttbeton (fiber reinforced shotcrete: FRS) az alkalmazott acélhálós erősítés kiváltására hivatott, mellyel rengeteg időt lehet megtakarítani, mivel az alagút falára felhelyezett hálós erősítés nehézkes és lassú feladat, továbbá a háló pozicionálása sem tud kellően pontos lenni (Vandewalle, 1992). Ausztráliában már a bányák 90%-ban szintetikus szálerősítésű lőttbetont használnak ([www.elastoplastic.com](http://www.elastoplastic.com)).

Az egyik legnagyobb szintetikus szálerősítésű alagút a Devil's Slide alagút Kaliforniában, San Mateo mellett (27. ábra). Az iker alagút rendre 1,26 km és 1,23 km hosszú északi és déli alagutakból áll, nagyjából 9 m szélességű és 4,75 m magassággal, amelyeket 200 méterenként kereszt átjárók kötik össze. Az alagút egy külső, lőttbeton szintetikus szálerősítésű részből (28. ábra) és egy belső, monolit vasbeton alagútból áll, kettő között vízszigeteléssel (Zerga et. al. 2011; Madsen et. al. 2009).



**27. ábra:** Devil's Slide alagút, Kalifornia, San Mateo

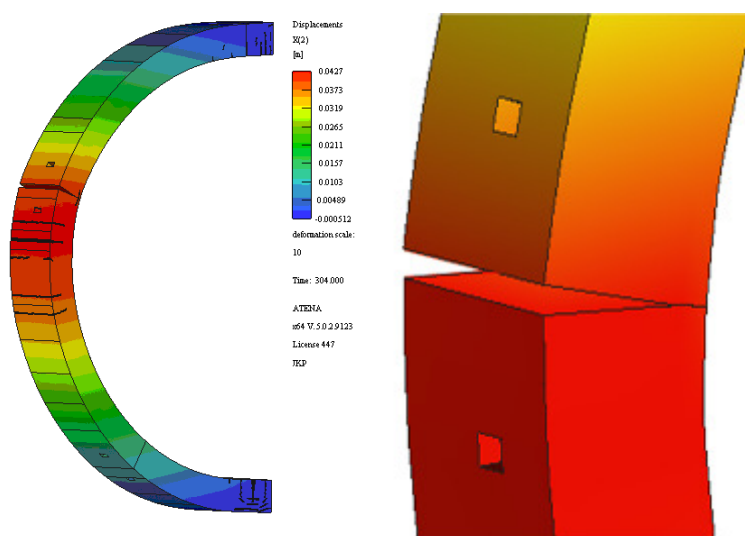


**28. ábra:** szintetikus szálerősítésű löttbeton készítés közben, Devil's Slide, Kalifornia

Löttbetonnal nemcsak alagutat, hanem egyéb szerkezeteket is készítenek, úgymint hídszerkezet megerősítést, rézsű megtámasztást, löttbeton medencéket és víztározókat.

### Alagutak

A löttbeton alagutakon túl a szintetikus szálerősítést egyre inkább használják szegmentált (TBM) alagútszerkezeteknél is, leginkább repedés-tágasság csökkentésére és vasalás redukálására (Martin és Juhász, 2012). Korszerű, törési energiát is kezelni tudó végelem programokkal ezen szegmentált alagutak pontosan méretezhetőek, a vasalás redukálása számszerűsíthető, repedés-tágasság kontrollálható (29. ábra).

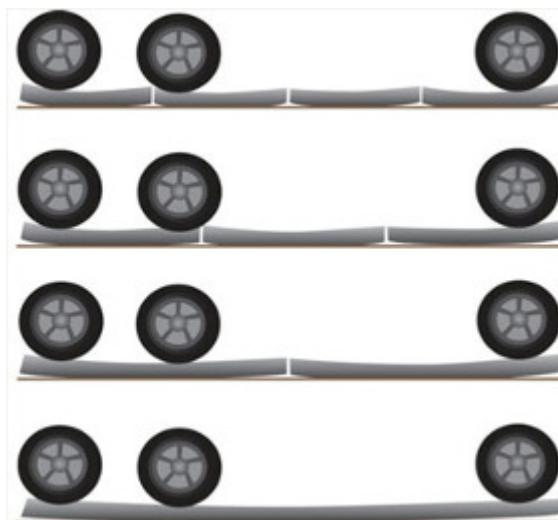


**29. ábra:** alagútszerkezet végelem számítása (a szerző méretezése)



### Út- és vasút pályalemezek

A beton útszerkezetek reneszánszukat élik. Az aszfalt úttesthez képest nagy előnyük a kisebb karbantartási igényük és nyomvályúsodás mentességük. A bonyolult megoldandó feladat az aszfalt utakhoz képest a dilatációk távolsága és kialakítása. Erre ad jó megoldást a Thin Whitetopping (TWT) és a Thin Concrete Pavement (TCP) ([www.tcpavements.com](http://www.tcpavements.com)). A TWT meglévő aszfaltburkolatok felújítására szolgál, míg a TCP új útszerkezetek építésére. A TCP lényege a sűrű dilatálás, amellyel a keletkező feszültségeket csökkentik (30 ábra). Hazánkban ezzel a technológiával még nem készültek utak, de nagy jövő áll előttük, főleg gazdaságosságuk miatt. Egy ilyen megépült dél-amerikai utat láthatunk a 31. ábrán.



**30. ábra:** TCP kialakításának elve,  
dilatációk sűrítésével a lemezben ébredő feszültség csökken





**31. ábra:** TCP rendszerű út

A szintetikus makro szálak első jelentős hazai alkalmazása a szegedi villamospálya felújítása volt (Juhász, 2011), amelynek a szerző volt a statikus tervezője. A felújítás során 18,3 km villamospálya szakaszt újítottak fel és 4,8 km hosszú új szakaszt építettek (32. ábra).



**32. ábra:** szegedi villamospálya kivitelezés közben



A tervezés során a gyártó által biztosított tervezési értékeket vettük alapul, amelyeket a kivitelezés előtt a próbakeverésen vett gerendákkal igazoltunk. Nagyobb beruházásoknál mindenképp fontos, hogy a kivitelezés során alkalmazott betonnal legyen megvizsgálva a szál, ellenőrizve az előzetesen felvett értékeket. A szálerősítés alkalmazásával a kivitelezési idő radikálisan lecsökkent, mivel nem kellett a bonyolult betonacél armatúrát szerelni, szállítani és elhelyezni, nincs betontakarási probléma. A szerkezet teljesen korróziómentes lett, ezáltal a karbantartási munkálatok is csökkennek az idővel. Kóboráram okozta korrózió is megszűnt, sínszálak közötti rövidzárlat lehetősége is kiküszöbölhető. Útátjárókban és nagyobb terhelésű szakaszokban kiegészítő vasalással is kombinálható. A szerkezet nagy sikerét mi sem bizonyítja jobban, mint az, hogy Oroszországból, Szent Pétervárról érkezett küldöttség a villamospálya megoldást megtekintette és teljes egészében hasonló módszerrel építették meg a saját villamospálya bővítésüket is (33. ábra).



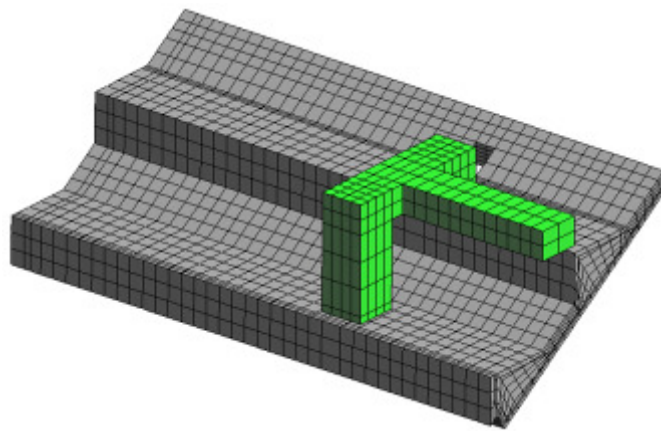
**33. ábra:** szentpétervári villamospálya építése

### **Nyírási vasalás kiváltása szálerősítés segítségével**

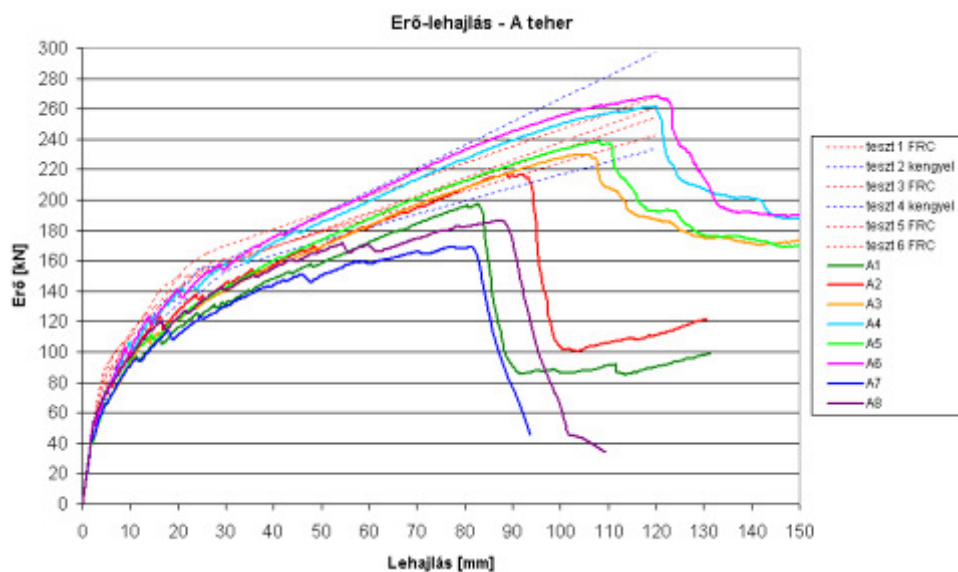
Szálerősítésű betonok egyik legújabb alkalmazási lehetősége a feszített szerkezetek nyírási vasalásának kiváltása. Büszkéek lehetünk arra, hogy Magyarországon készült el az első szintetikus makro szálerősítésű előregyártott feszített vasbeton szerkezet: a debreceni stadion tribüneleme, amelyből a nyírási vasalást teljes egészében kiváltottuk a szálakkal (Kovács, Juhász, 2013). Mivel egy új típusú szerkezetről van szó, ezért valós méretű laboratóriumi



tesztekkel igazolták az elem megfelelőségét a szentendrei ÉMI laboratóriumában. A laboratóriumi vizsgálatokkal párhuzamosan anyagvizsgálatok (gerenda és kocka) is készültek a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékén. A legjobb teljesítményt mutató szintetikus szálal, a Barchip 48-at választottuk ki. Az anyag paraméterek meghatározása után numerikus számítással (ATENA) optimalizáltuk a száladagolást (34. ábra), majd további, különféle terhelési esetekkel terheltük és vizsgáltuk a virtuális modellt. A valós értékeket jól közelítették a numerikus analízis eredményei (35. ábra).



**34. ábra:** numerikus modell



**35. ábra:** kísérleti és numerikus teszteredmények



## 9. Összefoglalás

A dolgozatomban a szintetikus szálerősítésű betonok alkalmazásának lehetőségeit mutattam be betontechnológiai szempontból. Különbséget tettem *szintetikus mikro* és *makro* szálerősítések között, laboratóriumi kísérlettel igazoltam a brit BS EN 14889 szabvány álláspontját, miszerint statikai hatása csak a szintetikus makro szálnak van, mikro szálaknak csak a kezdeti zsugorrepedések kialakulásának meggátlásában van jelentősége. Bemutattam a szálak betontechnológiai hatását a frissbeton keverékre és a megszilárdult betonra egyaránt. Különböző típusú hazai és külföldi makroszálakat hasonlítottam össze „*A Nagy Törés*” elnevezésű laborvizsgálat keretében, ezen kutatások adatait is részletesen közöltem. Megállapításokat és kiegészítéseket tettem a szálak betontechnológiát módosító tervezésére, érintettem az öntömörödő és nagyszilárdságú betonokat is. Végül hazai és nemzetközi példákat mutattam be a szintetikus makroszálak megfelelő alkalmazására.

A szintetikus anyagok nagy jövő előtt állnak olyan kedvező tulajdonságaik miatt, mint a rozsdamentesség és savakkal, lúgokkal szembeni nagyfokú ellenálló képességük miatt. Habár szilárdsági szempontból az acélhoz képest még gyerekcipőben járnak, érdemes már most is foglalkozni velük, mert bizonyos területeken a képesek versenybe szállni a jól bevált acél szálerősítéssel. Évtizedek alatt a szintetikus polipropilén anyag rugalmassági modulusa és húzószilárdsága a technika fejlődésével a többszörösére növekedett, így a jövőt tekintve még jobb anyagok kifejlesztését várhatjuk, amivel akár radikálisan megváltozhat a *vasbeton*, mint szó jelentése az angol elnevezés irányába: *reinforced concrete*, ami annyit jelent, hogy *erősített beton*.

Véleményem szerint még nagyon keveset tudunk a szintetikus makro szálerősítésű betonokról, azok szerkezetre, annak élettartamára és mechanikai tulajdonságaira gyakorolt tényleges hatásáról. Rendkívül sok kutatási irányt ad ez az új anyag, akár kombinálva mikroszálakkal vagy kiegészítő anyagként hagyományos vasalás mellé. Mivel bizonyos területeken ez az egyetlen alternatíva (magas korrózióveszély, sav- és lúgos hatások, elektromosság), így kutatása és fejlesztése további lendülettel halad előre.



---

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MÉRNÖKGEOLÓGIA TANSZÉK

Tel: 463-4068 \* 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. \* Fax: 463-3450

Végül egy idézettel zárom a dolgozatot, amely azt a kérdést feszegeti, hogy szintetikus anyagokkal valaha kiváltható lesz-e a hagyományos betonacél vasalás:

*„A leghalványabb jele sincs annak, hogy a nukleáris energia valaha is hasznosítható lesz.”*

Albert Einstein, 1932



## 10. Hivatkozások

- ACI Committee 544 (2002) „State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete”, *ACI 544.1R-96*
- Attree, G. (2011) „Macro-synthetic fibres, long-term behaviour and the importance of CE marking”, *Concrete Magazine*, 2011 September
- Balázs L. Gy. (2002) „Szálerősítésű betonok – Terminológia és anyagjellemzők”, *Terminológia: Magyar nyelvű szakelőadások a 2001-2002-es tanévben: Építő- és építészmérnöki Kar, Kolozsvár*, 2002
- Balázs Gy. (2007) „Különleges betonok és betontechnológiák I.”, *Akadémia Kiadó*, Budapest
- Bazant, Z. P., Oh, B. H. (1983) „Crack band theory for fracture of concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 16, 1983, pp. 155–177.
- Bentur, A., Mindess, S., „Fiber Reinforced Cementitious Composites”, 2nd Edition, *Taylor & Francis*, pp. 601
- Bernard, E. S., (2002) „Correlations in the Behaviour of Fibre Reinforced Shotcrete Beam and Panel Specimens”, *Materials and Structures*, Vol. 35, 2002, pp. 156-164.
- Bernard, E. S. (2008) „Embrittlement of Fiber-Reinforced Shotcrete”, *Shotcrete*, Vol. 10 (2008) No. 3, pp. 16-21.
- Bernard, E. S. (2009) „Design of fibre reinforced shotcrete linings with macro-synthetic fibres”, *Shotcrete for Underground Support XI*, Eds, ECI Symposium Series, Volume P11, <http://dc.engconfintl.org/shotcrete/14>, megtekintve: 2013. június 15.
- BS EN 14889 Technical Committee B/517 (2006) „Fibres for concrete - part 2: Polymer fibres”, *British Standard BS EN 14889*
- Casanova, P., Rossi, P. (1997) „Analysis and design of steel fiber reinforced concrete beams”, *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 5, 1997, pp. 595-602.
- Chao, S. H., Cho, J. S., Karki, N. B., Sahoo, D. R., Yazdani, N. (2011) „FRC Performance Comparison: Direct Tensile Test, Beam-type Bending Test and Round-panel Test”, *ACI Special Publication 276-Durability Enhancements in Concrete with Fiber Reinforcement*, Vol. 276, pp. 1-20.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2011) „Characterization of Self-Compacting Concretes Prepared with Different Fibres and Mineral Additions”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 33, No. 5, pp. 596-601.



- Deák Gy., Dulácska E. (1994) „Vasbeton szerkezetek”, *BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék*
- Dupont, D., Vandewalle, L., (2004) „Comparison between The Round Plate Test and The RILEM 3-Point Bending Test”, *6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC) – BEFIB 2004*, 20-22 September 2004, Varenna, Italy, pp. 101-110.
- EFNARC (2011) „EFNARC three point bending test on square panel with notch”, EFNARC
- Foote R., Mai Y. W., Cotterell B. (1985) „Process size and crack growth measurements in fibre cements”, *Fibre reinforced concrete properties and applications*, American Concrete Institute, Detroit, 1985, pp. 55–70.
- Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A.W., Kaynia, A., (2002) „Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption”, *Report, Norwegian Geotechnical Institute*
- Grunewald, S., Walraven, J. C., (2001) „Parameter-Study on the Influence of Steel Fibres and Coarse Aggregate Content on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001. pp 1793-1798.
- Halvax K., Lublóy É. (2012) „Szálerősítésű betonok alkalmazási területe”, *Beton újság XX. évf. (11-12)* pp. 3-8.
- Hossain K.M.A., Lachemi M., Sammour M., Sonebi M. (2013) „Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres”, *Construction and Building Materials*, Vol. 45, pp. 20–29.
- Hu X., Wittmann F. H. (1990) „Experimental method to determine extension of fractureprocess zone”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1990, 2(1), pp. 15–23.
- Juhász K. P., Nagy, J. (2011) „Fű-szál-erősítés: Európában is korszerűnek számító villamospálya-szerkezetek és megoldások Szegeden”, *Mérnök Újság*, XVIII-12, pp. 24-26.
- Juhász K. P. (2013, a) „Szintetikus mikro és makro szálerősítésű betonok közötti különbségek”, *Beton újság XXI. évf. (11-12)* pp. 3-5.
- Juhász K. P. (2013, b) „Beton és szálerősítésű beton húzó-hajlító szilárdságának meghatározása nemlineáris számításokhoz”, *Anyagvizsgálók Lapja* 23. évf.:(1-2) pp. 28-31.
- Juhász, K. P. (2013, c) „Modified fracture energy method for fibre reinforced concrete”, *Fibre Concrete 2013: Technology, Design, Application*, Prága, Csehország, 2013.09.12-2013.09.13. pp. 89-90. Paper p07. ISBN: 978-80-01-05238-9



- Juhász K. P. (2014) „Mikro és makro szintetikus szálakkal készített beton próbatestek vizsgálata”, megjelenés alatt: *Építés-Építészettudomány*, 2014 - publikálás alatt
- Khayat, K. H., Roussel, Y., (1999) „Testing and Performance of Fiber-Reinforced, Self-Consolidating Concrete”, *RILEM PRO 7, Self-Compacting Concrete*, eds. A. Skarendahl, O. Petersson, Bagneux (France): *RILEM Publications S.A.R.L.*, pp. 509-521.
- Kollár, L. P., Springer G. S. (2003) „Mechanics of composite structures”, Cambridge University Press
- Kovács, G., Juhász, K. P., „Precast, prestressed grandstand of PFRC in stadium, Hungary”, Central European Congress on Concrete Engineering: Concrete Structures in Urban Areas. Wroclaw, Lengyelország, 2013.09.04-2013.09.06. Paper 104. ISBN: 978-83-7125-232-7
- Kovács, I., Balázs, L. Gy. (2004) „Structural performance of steel fibre reinforced concrete” *Műegyetemi Kiadó*, Budapest
- Lee, S.C., Cho, J.Y., Vecchio, F. J., (2011) „Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete in Tension: Model Development”, *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 5, Sept.-Oct. 2011, pp. 516-525.
- Lok, T., Xiao, J. (1999) „Flexural strength Assessment of steel fiber reinforced concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3
- Madsen, P.H., Decker J.B., Zeidler K., Gall V., O'Brien T.M. (2009) „Experience with synthetic fiber reinforced initial shotcrete lining at the Devil's Slide Tunnel Project”, *Spritzbeton-Tagung*
- Magyari B. (1999) „Az összetétel hatása a szálerősítésű beton és habarcs tulajdonságaira”, *Szálerősítésű Betonok - a kutatástól az alkalmazásig*, konferenciakiadvány, pp. 114-121.
- Maidl, B.R. (1995) „Steel Fibre Reinforced Concrete”, *Ernst & Sohn*
- Martin, G., Juhász, K. P. (2012) „Current state of the art usage of structural synthetic fibres as a replacement for steel mesh and steel fibres in sprayed primary linings, final linings, cast in situ linings and in precast segmental linings”, *1st Eastern European Tunnelling Conference: Alagút- és Mélyépítő Napok 2012*. Budapest, Magyarország, 2012.09.18-2012.09.21. Budapest: pp. 41. ISBN: 978-963-89638-0-2
- Mathews, M. S., Lub K. B. (1983) „Steel fibre reinforced concrete, its definition, development, behaviour and uses”, Eindhoven
- Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. (2003) „Concrete”, 2nd Edition, *Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ*.





- Naaman, A. (2008) „High Performance Fiber Reinforced Cement Composites”, volume 1 of Engineering Materials for Technological Needs, chapter 3, pp. 91–154., *World Scientific Publishing Co.*
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) (2008) „Richtlinie Faserbeton”, *Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik*, Wien 2008
- RILEM TC50-FMC (1985) „Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams”, *Materials and Structures*, Vol. 18., No. 106., pp. 285-290.
- The Concrete Society (2003) „TR34 Concrete industrial ground floors”, *The Concrete Society*, Crowthorne 2003
- The Concrete Society (2013) „TR34 Concrete industrial ground floors”, *The Concrete Society*, Crowthorne 2013
- Voo, J. Y. L., Foster, S. J., (2003) „Variable Engagement Model for Fibre Reinforced Concrete in Tension”, *Uniciv Report No. R-420*, School of Civil and Environmental Engineering, the University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, June 2003, 86 pp.
- Vandewalle, L., et al. (2002) „RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 33, January-February, pp. 3-5.
- Vandewalle, L., Rickstal, F. V., Heirman, G., Parmentier, B. (2008) „The round panel test and the 3-point bending test”, *7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications - BEFIB 2008*
- Vandewalle, M. (1992) „Tunnelling the World”, *N.V. Bekaert S. 4.*, Zwevegem, Belgium
- Xu, H., Mindess, S., Banthia, N., (2004) „Toughness of Polymer Modified, Fiber Reinforced High Strength Concrete: Beam Tests vs. Round Panel Tests”, *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur*, Editors: Weiss, J., Kovler, K., Marchand, J., and Mindess, S., *RILEM Publications SARL*
- Zerga D, Kumpfmüller S. (2011) „The detail in the Devil’S Slide”, *North American Tunneling Journal*, 2011 Április-Május, pp. 10-14
- Zhang, J., Stang, H. (1998) „Applications of stress crack width relationship in predicting the flexural behaviour of fibre-reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 3, Dec. 1998, pp. 439-452.