



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR
ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK

1111 Budapest, XI., Műegyetem rkp. 3.

Tel.: +36-1-463-4068 • WEB <http://em.bme.hu> • E-mail: titkars@eik.bme.hu

JELENTÉS

POLISZTIROLBETON TŰZ, HŐ- ÉS PÁRATECHNIKAI LABORVIZSGÁLATA

Megbízó: ICL Kft.
Székhely: 6000 Kecskemét, Mátyás Király krt. 52.

Készítették:

Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva
egyetemi docens

Dr. Nagy Balázs
adjunktus

Dr. Hlavička Viktor
adjunktus



Biró András
doktorandusz

Dr. Dunai László
tanszékvezető

Budapest, 2020. december 09.



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR
ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK
1111 Budapest, XI., Műegyetem rkp. 3.

Tel.: +36-1-463-4068 • WEB <http://em.bme.hu> • E-mail: titkars@eik.bme.hu

JELENTÉS

POLISZTIROLBETON TŰZ, HŐ- ÉS PÁRATECHNIKAI LABORVIZSGÁLATA

Megbízó: ICL Kft.
Székhely: 6000 Kecskemét, Mátyás Király krt. 52.

Készítették:

Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva
egyetemi docens

Dr. Hlavička Viktor
adjunktus

Biró András
tanszéki mérnök

Dr. Nagy Balázs
adjunktus

Dr. Dunai László
tanszékvezető

Budapest, 2020. november 14.

Tartalom

1.	BEVEZETÉS	3
2.	SZAKIRODALOM.....	4
2.1	Betonok viselkedése tűzteherre	4
2.1.1.	A beton kémiai és fizikai változása hőterhelés hatására	4
2.1.2.	A betonfelület réteges leválása.....	9
2.2	Könnnyűbetonok viselkedése magas hőmérsékleten	14
2.3	Betonok és könnyűbetonok hővezetési tényezője	19
2.4	Betonok és könnyűbetonok higroszkopikus szorpciós izotermája.....	25
3.	KÍSÉRLETI MÓDSZER.....	28
3.1	Tűzállóság	28
3.2	Nyomószilárdság.....	29
3.3	Hővezetési tényező.....	29
3.4	Hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező.....	30
3.5	Higroszkopikus szorpciós izoterma	30
4.	KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK	30
4.1	Szemrevételezés a tűzterhelés után	30
4.2	Nyomószilárdság alakulása a hőterhelés után	31
4.3	Hővezetési tényező	33
4.4	Hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező.....	33
4.5	Higroszkopikus szorpciós izoterma	34
5.	ÖSZEFoglalás	35
6.	IRODALOM	36

1. BEVEZETÉS

Az **ICL Kft.** megbízta a **BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékét**, hogy elvégezze a cég által gyártott polisztirolbeton tűz, hő- és páratechnikai laborvizsgálatát.

A feladat során a következő részfeladatokat végeztük el:

- próbatestek kemencés hőterhelése és nyomószilárdság vizsgálata,
- hővezetési tényező mérése,
- higroszkopikus szorpció izoterma meghatározása.

2. SZAKIRODALOM

2.1 Betonok viselkedése tűzterherre

A hőmérséklet emelkedésével a beton szilárdsági jellemzői romlanak, sőt a beton a lehűlés után sem nyeri vissza eredeti tulajdonságait, jellemzőit, mivel a hőterhelés hatására a beton szerkezetében visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, a beton szerkezete meg bomlik, tönkremegy.

A betonszerkezetek tönkremenetele alapvetően két okra vezethető vissza (*Kordina, 1997*):

- (1) a beton alkotóelemeinek kémiai átalakulására,
- (2) a betonfelület réteges leválására.

2.1.1. A beton kémiai és fizikai változása hőterhelés hatására

A betonban lejátszódó kémiai folyamatok alakulását a hőmérséklet növekedésének hatására termoanalitikai módszerekkel (TG/DTG/DTA) vizsgálhatjuk. A TG (termogravimetriás) és a DTG (derivált termogravimetriás) görbék segítségével a tömegváltozással járó átalakulások mennyiségi elemzése lehetséges. A DTA (differenciál termoanalízis) görbékkel nyomon követhetjük a mintákban a hőmérséklet növekedésének hatására bekövetkező exoterm (hőtermelő) vagy endoterm (hőelnyelő) folyamatok alakulását.

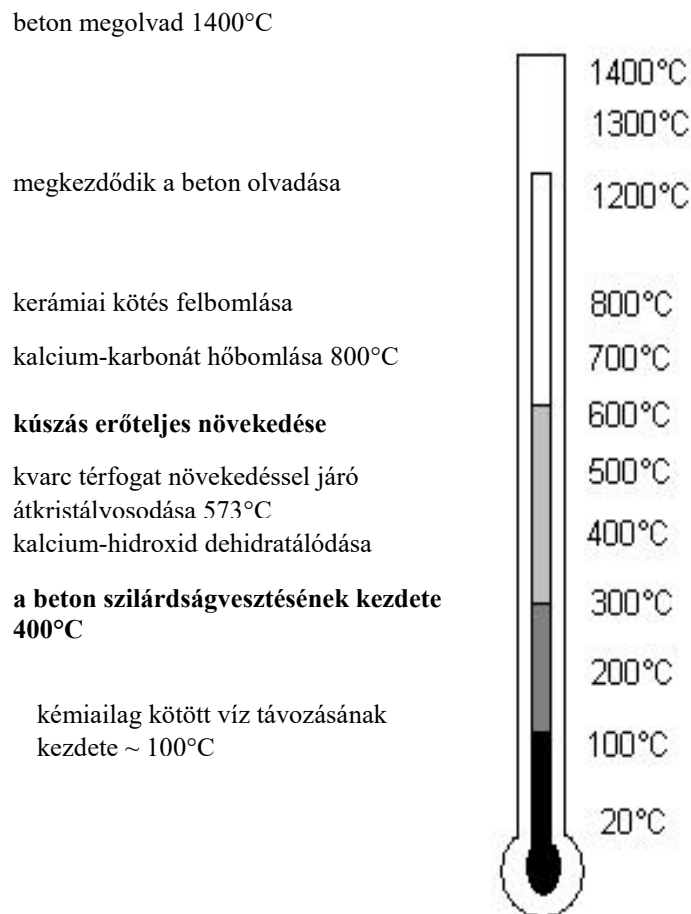
A beton szilárdsági tulajdonságainak változása magas hőmérsékleten függ (*Thielen, 1994*):

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

Magas hőmérséklet hatására a beton szerkezete és ásványtani összetétele megváltozik, a betonban lejátszódó kémiai folyamatok a 2.1. ábrán láthatók.

100°C körül a tömegvesztés a makro-pórusokból távozó víz okozza. Az ettringit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) bomlása 50°C és 110°C között következik be. 200°C körül további dehidratációs folyamatok zajlanak, ami a tömegvesztés újabb kismértékű növekedéséhez vezet. A különböző kiinduló nedvességtartalmú próbatestek tömegvesztése eltérő lesz egészen addig, amíg a pórusvíz és a kémiailag kötött víz eltávozik. A kiinduló

nedvességtartalom függvényében a tömegveszteség eltérése különösen a könnyűbetonok esetén jelentős. A kiinduló nedvességtartalomtól függő további tömegveszteség 250°C-300 °C között már nem érzékelhető (*Khoury, Grainger, Sullivan, 1985*).



2.1. ábra: Fizikai és kémia változások a beton melegedése során (*Niels, 2005*)

450 °C és 550 °C között a nem karbonátosodottportlandit bomlása következik be ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}\uparrow$). Ez a víz eltávozásával járó változás hőelnyelő reakcióval jár. Ez a folyamat endoterm (hőelnyelő) csúcsot és ezzel egyidejűleg újabb tömegveszteséget okoz (*Schneider, Weiss, 1977*).

A közönséges betonok esetén a kvarc $\alpha \rightarrow \beta$ kristályátalakulása 573 °C-on okoz kis intenzitású endoterm csúcsot. A kvarc átalakulása 5,7%-os térfogat-növekedéssel jár (*Waubke, 1973*), ami a beton lényeges károsodását eredményezi. Ettől a ponttól a beton nem teherhordó.

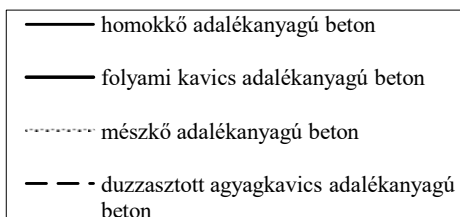
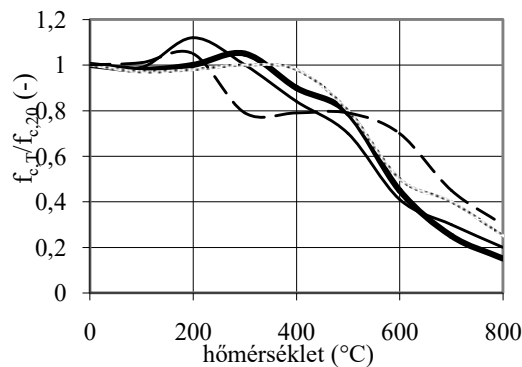
700 °C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ami szintén térfogat-növekedéssel jár (*Hinrichsmeyer, 1987*). Ez a folyamat mind a könnyű-, mind a normálbetonok esetén lejátszódik, és jelentős szilárdságcsökkenést okoz.

A beton pórusszerkezete három részből áll: a cementkő porozitása, az adalékanyag felülete és a cementkő közötti (kontaktzóna) porozitás, valamint az adalékanyag porozitása. (Az utóbbi csak nagy porozitású adalékanyagoknál játszik szerepet, pl.: könnyűbetonoknál).

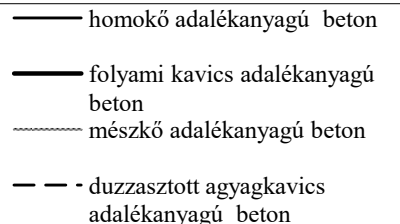
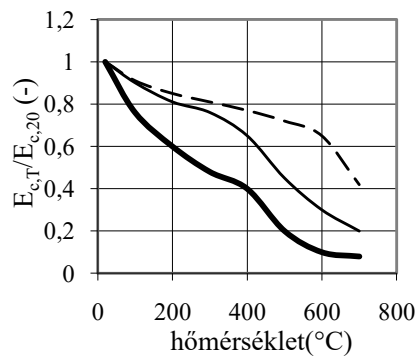
A kvarckavics adalékanyagú betonoknál 150 °C-ig a cementkő porozitása, valamint az adalékanyag és a cementkő közötti kontaktzóna porozitása nő. A kontaktzónában 150 °C-ig repedések keletkezhetnek, amit az adalékanyag és cementkő különböző hőtágulásával magyarázhatunk. A cementkő struktúrája 450 °C-ig stabil, de mikrorepedések már e hőmérséklet alatt is kialakulhatnak. 450 °C-550 °C között azonban a portlandit bomlása miatt a pórusok száma megnő. Ezután 650 °C-ig a cementkő felépítése nem változik. E felett a CSH vegyületek bomlása megkezdődik és a kapillárisok száma megnő. 750 °C felett a pórusok átmérője nagymértékben növekszik. A mikrorepedések mérete nagymértékben függ az adalékanyag legnagyobb szemmagyságától (*Hinrichsmeyer, 1987*).

A beton szilárdsági jellemzőinek magas hőmérséklet hatására bekövetkező változását legnagyobb mértékben az adalékanyag típusa határozza meg. (*Schneider, 1986; Houry et al, 2001*). *Schneider (1986)* alapján a 2.2. és a 2.3. ábrán jól látható, hogy az adalékanyag típusa jelentősen befolyásolja a beton magas hőmérsékleten való viselkedését: minden adalékanyag típushoz jellegzetesen más viselkedés tartozik. Ennek legkézenfekvőbb magyarázata, hogy a különböző adalékanyagok alakváltozása a hőmérséklet függvényében eltérő (*Niels, 2005*).

A nyomószilárdság vizsgálatát ebben a kísérletsorozatban is szobahőmérsékletre visszahűlt állapotban végezték, mivel a melegen vizsgált próbatestek maradó nyomószilárdsága nagyobb, mint a szobahőmérsékleten vizsgáltaké (*Schneider, 1986*). A nyomószilárdság-hőmérséklet összefüggés diagramján (2.2. ábra) 200 °C-ig nem olvasható le egyértelmű tendencia. A kvarckavics és a mészkő adalékanyagú betonok esetén kezdeti szilárdságcsökkenést figyelhetünk meg, amit átmeneti szilárdságnövekedés követ. Az átmeneti szilárdságcsökkenésre logikus magyarázatot nyújthat a cementkő és az adalékanyag különböző hőtágulási együtthatója (*Hinrichsmeyer, 1987*). A cementkő és az adalékanyag hőtágulása miatt az adalékanyag szemcsék és a cementkő határfelületén mikrorepedések keletkeznek. A hőmérséklet emelkedése során az adalékanyag növekvő hőtágulása miatt ezek a repedések záródnak.



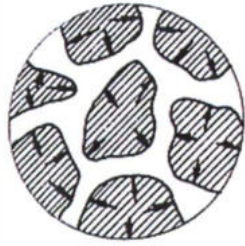
2.2. ábra: A beton relatív maradó nyomószilárdságának változása magas hőmérsékleten az adalékanyag típusától függően (Schneider, 1986)



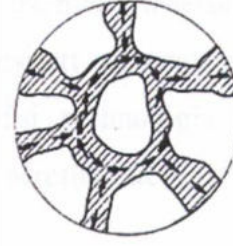
2.3 ábra: A beton relatív maradó rugalmassági modulusának változása magas hőmérsékleten az adalékanyag típusától függően (Schneider, 1986)

400 °C-ig a nyomószilárdság értékei csökkenő tendenciát mutatnak, a fellépő szilárdságcsökkenést a cementmátrix berepedezésével magyarázhatjuk. 400 °C felett a különböző adalékanyagú betonok szilárdsági értékeinek alakulását külön kell tárgyalni, mivel lényegesen eltérő tendenciát mutatnak. A kvarckavics adalékanyagú betonok szilárdságcsökkenése 550 °C-ig megközelítőleg 40%, a duzzasztott agyagkavics esetén ez a szilárdságcsökkenés jóval kisebb, mintegy 20%. A szilárdságcsökkenést 450 °C—550 °C között a portlandit bomlása, valamint az adalékanyag és a cementkő eltérő hőtágulása okozza.

A beton maradó nyomószilárdságát nagymértékben befolyásolja a beton alkotóelemei közötti teherátadás módja. A teherátadási mód a beton egyes alkotóelemeinek egymáshoz viszonyított szilárdsági és merevségi viszonyaitól függ. A nyomásból származó igénybevételek a nagyobb szilárdságú és nagyobb merevségű összetevőn keresztül adódnak át. A teherátadás módja lényegesen különböző a kvarckavics adalékanyagos és a könnyű adalékanyagos betonok esetén (2.4. a), és b) ábra).



a) kvarckavics adalékanyag esetén

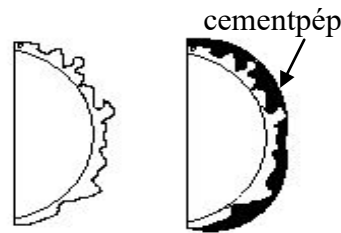


b) könnyűbetonok esetén

2.4. ábra: A belső teherátadás módja (Romić, Lazić, 1985)

A kvarckavics adalékanyagú betonnál a habarcsréteg közvetíti az adalékanyag szemcsék között a teher jelentős részét, de a teherviselés elsősorban az adalékszemcsék feladata. A szokványos betonok hőterhelésre történő tönkremenetele a kontaktzónában következik be, amit az adalékanyag és a cementkő rugalmassági modulusának eltérése, illetve az adalékanyag felületén lerakódott portlandit (kalciumhidroxid) és ettringit réteg dehidratációja okoz. Az adalékanyag felületén vékony vízréteg válik ki, itt kristályosodnak ki a portlandit, valamint az ettringit ásványok. A nyomófeszültségi trajektóriák az adalékanyag szemcséken keresztül futnak, ezért a közönséges betonok nyomószilárdság értékét alapjában véve a cementkő-váz szilárdsága korlátozza. A nagyszilárdságú betonok viselkedése ettől jelentősen eltér: a kalcium-hidroxid a szilikaporrall reakcióba lép és kalcium-szilikahidrát képződik, ami az adalékanyag szemcsék felületén lerakódott réteg (kontaktzóna) szilárdságát növeli. Emiatt a nagyszilárdságú betonok jellemző tönkremeneteli helye nem a kontaktzóna, hanem az adalékanyag szemcsék széthasadása (hasonlít a könnyűbetonra).

A könnyűbetonban az adalékanyag könnyebben összenyomható, a teherviselés elsődlegesen a habarcsváz feladata. Az adalékanyag szemcsék csak kis mértékben vesznek részt a teherviselésben (Ujhelyi, 1995; Ujhelyi, 2005; Faust, 2000). A teherátadás módjának megváltozását az okozza, hogy a cementkő és a könnyű adalékanyagok rugalmassági modulusa jóval közelebb van egymáshoz, mint a kvarckavics és a cementkő rugalmassági modulusa. Könnyűbetonok esetén az adalékanyag porózus szerkezete miatt a kontaktzóna lényegesen nagyobb szilárdságú, mint a kvarckavics adalékanyagú betonok esetén. Az adalékanyag porózus felülete miatt az adalékanyag felületén levő pórusokba a cementpép behatol (2.5. ábra), és egy fogazással ellátott erős kapcsolat alakul ki (Nemes, 2006). Az adalékszemcsék pórusaiba behatolt cementpép mennyisége az adalékanyag mikrostruktúrájától, a cement finomságától, illetve a cementpép viszkozitásától függ (Zhang, Gjorv, 1990). A nyomófeszültségi trajektóriák az adalékanyag szemcséi körül futnak.



2.5. ábra: Az adalékanyag felületének porózus szerkezete duzzasztott agyagkavics esetén
(Faust, 2003)

700°C fölött az adalékanyagtól függetlenül minden beton esetén további jelentős szilárdságsökkenést figyelhetünk meg, amit a CSH-vegyületek átalakulása okoz.

A beton rugalmassági modulusa – a nyomószilárdsághoz hasonlóan – hőmérséklet növekedésével folyamatosan csökken (2.3. ábra). A hőterhelés hatására a betonok közül a könnyűbetonok rugalmassági modulusa csökken a legkisebb mértékben. A legnagyobb mértékű csökkenést a kvarckavics adalékanyagú beton rugalmassági modulusa mutatja: itt a csökkenés már 100 °C-on 33% körüli érték; 400 °C-ig további csökkenés következik be mintegy további 20 %-kal csökken a rugalmassági modulus értéke; 400 °C-550 °C között jelentősebb, mintegy újabb 30 %-os csökkenés figyelhető meg; 600 °C felett a görbe enyhén eső tendenciát mutat. A 100°C-ig bekövetkező drasztikus csökkenést a pórusokból távozó víz és a repedések képződése okozza. A rugalmassági modulus jóval nagyobb mértékű csökkenést mutat, mint a nyomószilárdság (Hinrichsmeyer, 1987).

A beton hajlító-húzószilárdsága a nyomószilárdsághoz hasonlóan szintén nagymértékben függ az adalékanyag típusától. A hajlító-húzószilárdság szobahőmérsékleten mért értéke acélszál és üvegszál adagolás esetén nő, azonban a hőterhelés hatására bekövetkező relatív szilárdságsökkenés értékét a száladagolás nem, vagy csak kis mértékben befolyásolja.

2.1.2. A betonfelület réteges leválása

A betonfelületek réteges leválásának két oka lehet:

- (1) a betonból távozó vízgőz lefeszíti a felületi rétegeket;
- (2) a terhelt zóna már nem tudja a hőtágulásból származó újabb erőket felvenni és lemorzsolódik, leválik.

A nagyszilárdságú betonok felületének leválását általában a hőmérséklet emelkedésének hatására bekövetkező feszültségek okozzák; normálbetonok esetén általában a betonból távozó vízgőz feszíti le a felületi rétegeket. A betonfelület leválásának mechanizmusát a 2.6. ábrán láthatjuk: a betonfelület egyik oldalát hőterhelés éri, a betonból távozó vízgőz hatására egy vízgőzzel telített réteg alakul ki, ahol a vízgőz nyomása egyre nő és lefeszíti a betonrétegeket.

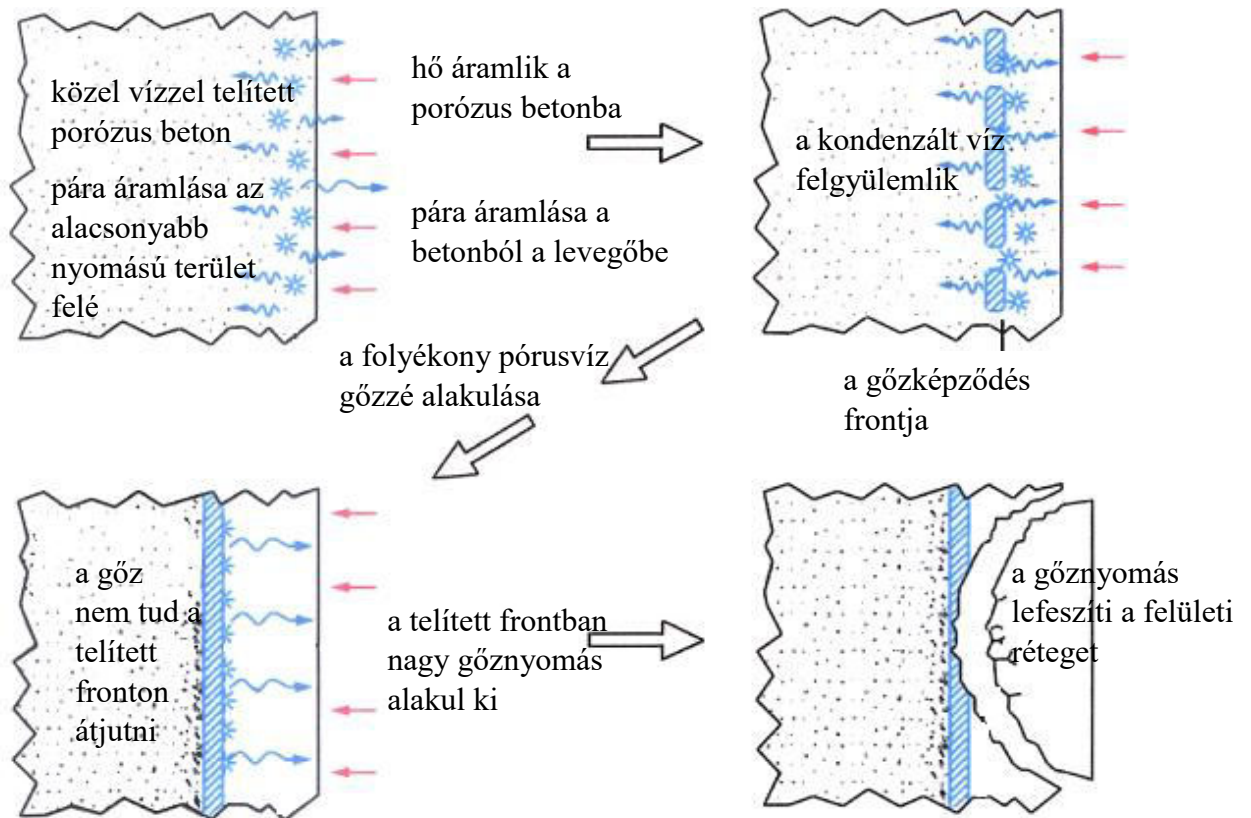
A betonfelület réteges leválásának az esélyét a következő tényezők befolyásolják:

- külső tényezők: a tűz jellege, a szerkezetre ható külső terhek nagysága;
- geometriai jellemzők: a szerkezet geometriai adatai, a betonfedés nagysága, a vasbetétek száma és elhelyezkedése;
- a beton összetétele: az adalékanyag mérete és típusa, a cement és a kiegészítő anyag típusa, a pórusok száma, a polipropilén száladagolás, az acél szálerősítés, a beton nedvességtartalma, áteresztőképessége és szilárdsága (*Silfwerbrand, 2004*).

A betonra átadódó nyomóerő függvényében változik a felület réteges leválásának esélye (2.7. ábra). Kisebb nyomóerő esetén kisebb keresztmetszeti méret előírása is elegendő a beton felület réteges leválásának megakadályozására. A 2.7. ábrán feltüntetett szükséges betonfedési értékek függetlenek a hőterhelés mértékétől és az időtartamától.

Alagutak esetén fontos, hogy a betonfelületek réteges leválása tűz esetén lehetőség szerint ne következzen be. Számos kísérlet igazolta, hogy a betonfelület leválásának veszélye műanyagszálak alkalmazása esetén lényegesen kisebb, mivel a szálváz kiégése során létrejövő pórusszerkezet a szétrepedés veszélyét csökkenti (*Richtlinie, 2005; Dorn, 1993*).

Mörth, Haberland, Horvath és Mayer (2005) alagútelemekekkel (hosszúság 11 m, magasság 2 m) végzett kísérletei igazolták, hogy a polipropilén szálakkal erősített betonok felületének réteges leválása a tűz hatására (1200°C-os hőterhelés esetén) nem következett be (2.8. és 2.9. ábra).

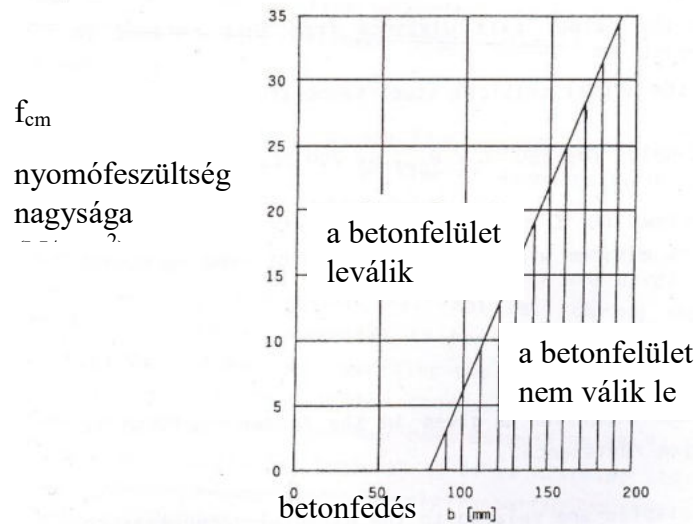


2.6. ábra: A betonfelület leválásának mechanizmusa

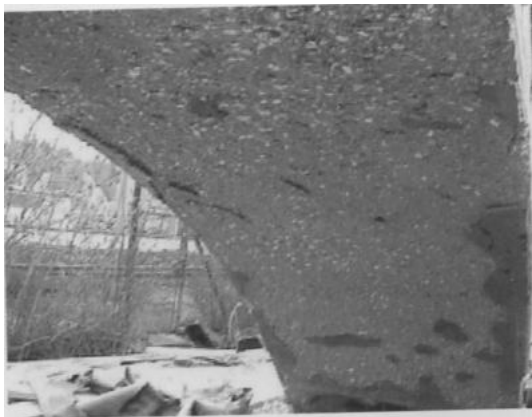
(Winterberg, Dietze, 2004)

Hasonló eredményre jutott Ausztriában egy másik kutatócsoport is (Waltner, Kari, Kutserle, Lindlbauer, 2005), amely nyomott lemezeket vizsgált. A hagyományos betonnál kétórás tűzterhelés hatására következett be a betonfelület réteges leválása, a polipropilén száladagolással készített lemez esetében viszont ez nem volt észlelhető (2.10. és 2.11. ábra).

Lényeges kérdés azonban, hogy – mindezen előnyös tulajdonságok mellett – a szálerősítésű beton nyomószilárdságának csökkenése se legyen drasztikus a szokványos betonhoz képest. Horiguchi (2005) a szálerősített betonok nyomószilárdságát vizsgálta magas hőmérsékleti tartományokban (2.12. ábra). A nyomószilárdságot 100 mm átmérőjű, 200 mm magas hengereken, szobahőmérsékletre visszahűlve vizsgálta. A felfűtés sebessége 10°C/perc volt, a próbatesteket 1 órán át tartotta az adott hőmérsékleten. Az alkalmazott beton víz-cement tényezője 0,3 volt (583 kg/m³-es cementadagolással). Az első beton szálerősítés nélkül, készült, a második 0,5 V%-os polipropilén száladagolással, a harmadik 0,5 V%-os acélszáladagolással, a negyedik 0,25 V%-os polipropilén és 0,25 V%-os acélszáladagolással készült.



2.7. ábra: A betonfelület réteges leválásnak tartománya (MSZ EN 1992-1-2)
(Érvényes lemezek, gerendák, falak és oszlopok nyomott zónáiban lévő kisebbik keresztmetszetre.)

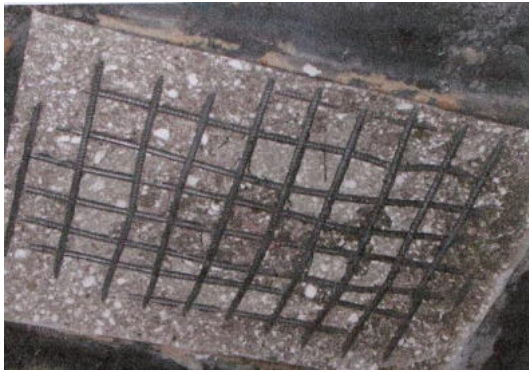


2.8. ábra: Száladagolás nélkül készült alagútelem 1200°C-os hőterhelés után

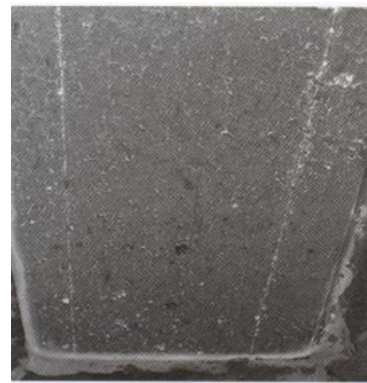


2.9. ábra: 2 kg/m³ polipropilén száladagolással készült alagútelem 1200°C-os hőterhelés után

(Mörth, Haberland, Horvath és Mayer, 2005)



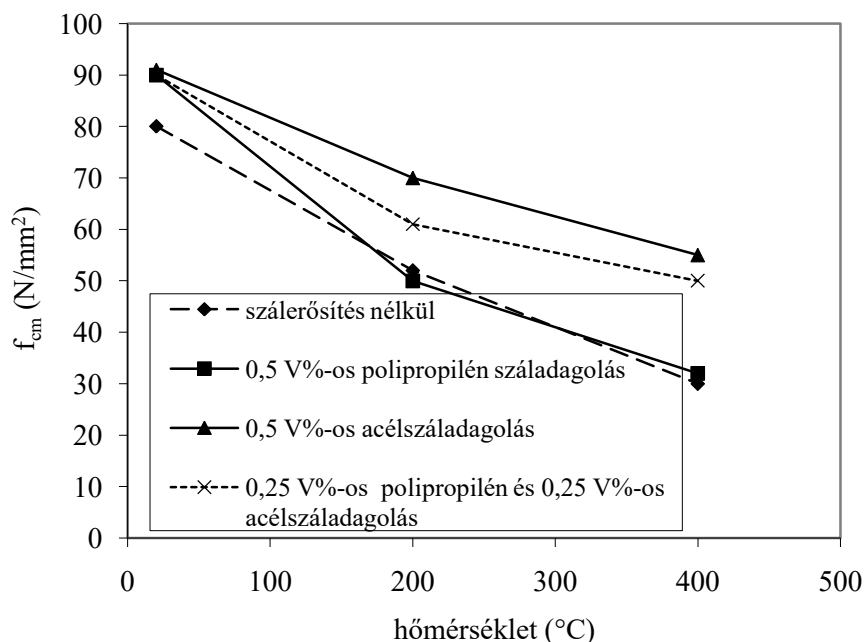
2. 10. ábra: Száladagolás nélkül készült lemez felülete 2 órás tűzteher után



2. 11. ábra: Műanyag száladagolással készült lemez felülete 2 órás tűzteher után

(Waltner, Kari, Kutserle, Lindlbauer, 2005)

A nyomószilárdság értékei a szálerősítés nélküli és a szálerősítésű betonok esetén hasonló tendenciát mutatnak. A szálerősítés nélküli és a műanyag száladagolású betonok esetén jóval alacsonyabb értékek figyelhetők meg a 200°C-os, illetve a 400°C-os hőterhelést követően, mint az acélszál, illetve a hibrid (0,25 V%-os polipropilén és 0,25 V%-os acél) száladagolás esetén. A fokozott szilárdságcsökkenést a műanyagszálak alkalmazása esetén műanyagszál-váz kiégése, valamint a kiégés során megnövekedett porozitás okozhatja.

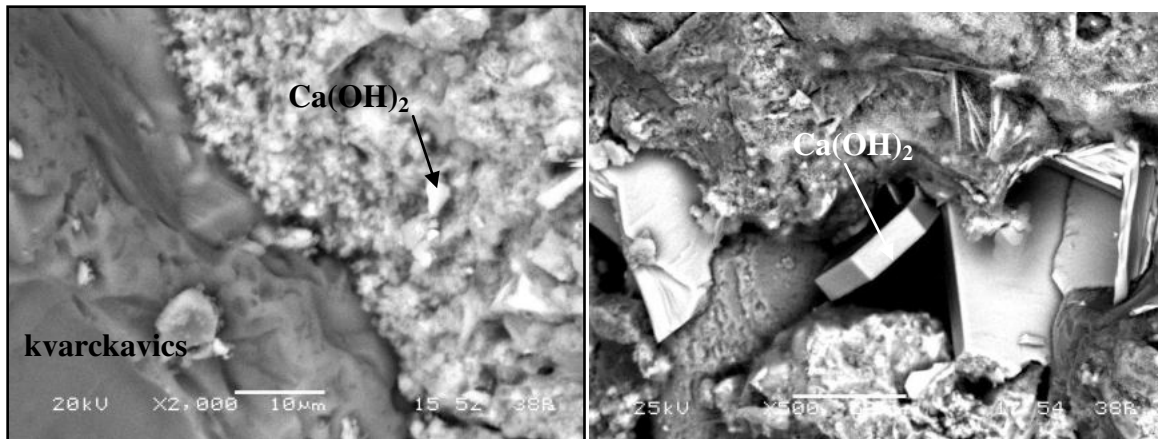
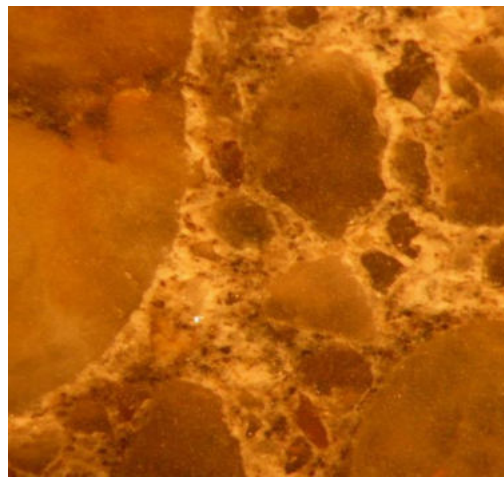


2.12. ábra: A szálerősítésű betonok nyomószilárdságának változása magas hőmérsékleten

(Horiguchi, 2005)

2.2 Könnyűbetonok viselkedése magas hőmérsékleten

A kvarckavics adalékanyagú betonnál a habarcsréteg közvetíti az adalékanyag szemcsék között a teher jelentős részét, de a teherviselés elsősorban az adalékszemcsék feladata. A normál betonok hőterhelésre történő tönkremenetele a kontaktzónában következik be, amit az adalékanyag és a cementkő rugalmassági modulusának eltérése, illetve az adalékanyag felületén lerakódott portlandit (kalcium-hidroxid) és ettringit réteg dehidratációja okoz. Az adalékanyag felületén vékony vízréteg válik ki, itt kristályosodnak ki a portlandit, valamint az ettringit ásványok (2.13. ábra).



N 2000

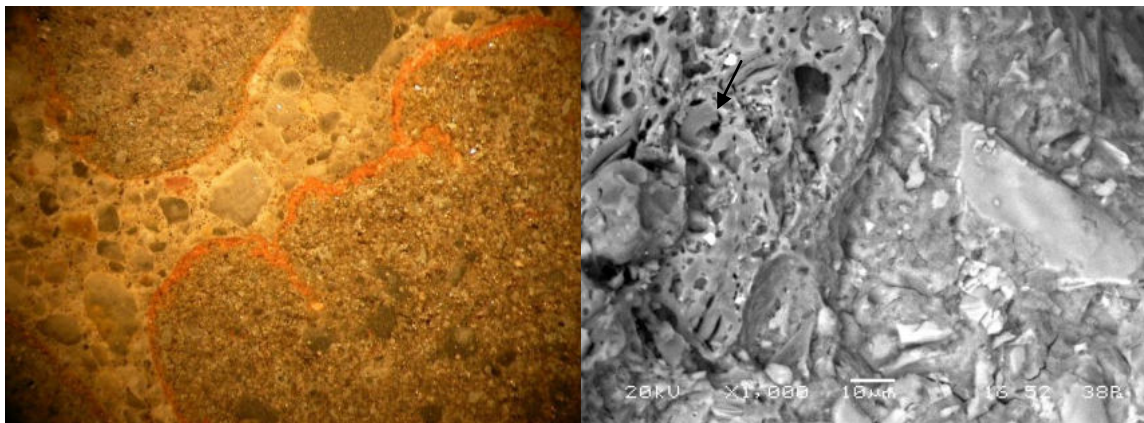
N 500

2.13 ábra: 20°C-on a kvarckavics adalékanyaggal készült beton (elektronmikroszkópos felvétel)

A nyomófeszültségi trajektóriák az adalékanyag szemcséken keresztül futnak, ezért a normál betonok nyomószilárdság értékét alapjában véve a cementkő-váz szilárdsága korlátozza. A nagyszilárdságú betonok viselkedése ettől jelentősen eltér: a kalcium-hidroxid a szilikaporról

reakcióba lép és kalcium-szilikahidrát képződik, ami az adalékanyag szemcsék felületén lerakódott réteg (kontaktzóna) szilárdságát növeli. Emiatt a nagyszilárdságú betonok jellemző tönkremeneteli helye nem a kontaktzóna, hanem az adalékanyag szemcsék széthasadása és ebben hasonlít a könnyűadalékos betonra.

A könnyűbetonban az adalékanyag szilárdsága kisebb, a teherviselés elsődlegesen a habarcsváz feladata. Az adalékanyag szemcsék csak kis mértékben vesznek részt a teherviselésben (Ujhelyi, 1995; Ujhelyi, 2005; Faust, 2000). A teherátadás módjának megváltozását az okozza, hogy a cementkő és a könnyű adalékanyagok rugalmassági modulusa jóval közelebb van egymáshoz, mint a kvarckavics és a cementkő rugalmassági modulusa. Könnyűbetonok esetén az adalékanyag porózus szerkezete miatt a kontaktzóna lényegesen más szerkezetű, mint a kvarckavics adalékanyagú betonok esetén (2.14 ábra). Az adalékanyag porózus felülete miatt az adalékanyag felületén levő pórusokba a cementpép behatol és egy fogazással ellátott erős kapcsolat alakul ki. Az adalékszemcsék pórusaiba behatolt cementpép mennyisége az adalékanyag mikrostruktúrájától, a cement finomságától, illetve a cementpép viszkozitásától függ (Zhang, Gjorv, 1990). A nyomófeszültségtrajektóriák az adalékanyag szemcséi körül futnak.



2.14. ábra: Az adalékanyag felületének porózus szerkezete duzzasztott agyagkavics esetén

A könnyűbetonok alkalmazásakor a tűzterherre való méretezés során körültekintően kell eljárni: az adalékanyag megfelelő kiválasztása és az adalékanyag viselkedésének ismerete nagyon lényeges kérdés.

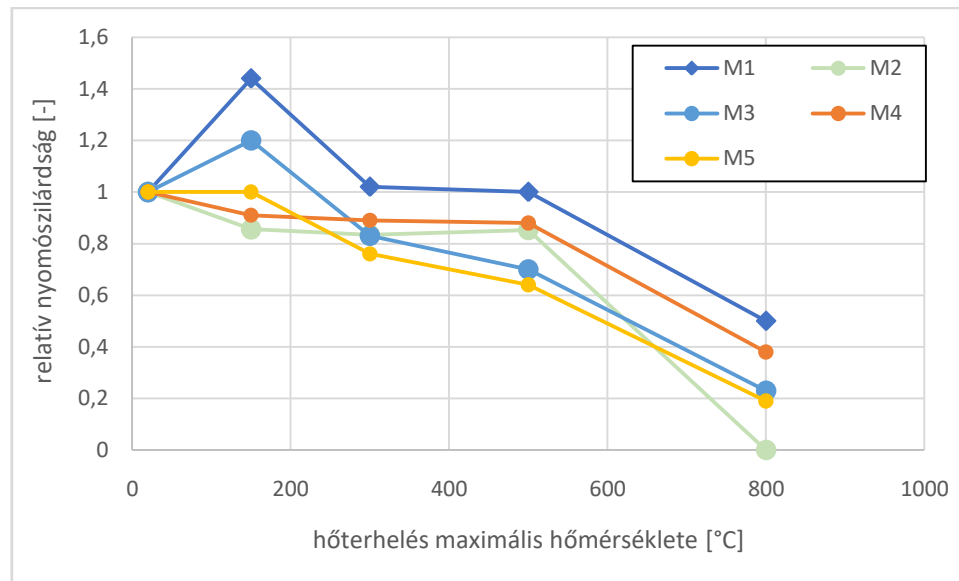
Laboratóriumi vizsgálatainkhoz 5 különböző könnyűadalékanyagos betont vizsgált 20 °C, 50 °C, 150 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C és 800 °C hőterhelést követően.

A hőterhelés utáni szemrevételezés alapján megállapították, hogy a kisebb szilárdságú adalékanyaggal készült a próbatestek 800 °C-os hőterhelés követően elszíneződtek, alacsonyabb hőmérsékletű hőterhelés esetén nem figyeltek meg elszíneződést. A nagyobb szilárdságú adalékanyaggal készült próbatestek a 800 °C hőterhelés alatt a kemencében a belső feszültség hatására darabjaira hullott, ezek alapján ezzel az adalékanyaggal készült próbatestek a betonfelület leválására hajlamossá teszik a betont. Megállapítható, hogy a betonfelületek leválására való érzékenység duzzasztott adalékanyagú beton esetén függ az adalékanyag szilárdságától, minél nagyobb az adalékanyag szilárdsága, annál nagyobb a betonfelület leválásnak az esélye.

Az 5N (kisebb szilárdságú) adalékanyag esetén (M1, M3 és M5) beton esetén, a szobahőmérsékleten mért szilárdsághoz képest nagyobb szilárdságot mértünk a 150 °C os hőterhelést követően (2.15 ábra). Ez az adalékanyag nagy vízfelvevő képességével magyarázható. 150C–oshőterhelést követően az adalékanyagban tárolt víz párolgása a beton nyomószilárdságát növelte. A 300 °C felett egyenletes szilárdságcsökkenés figyelhető meg. Ez megközelíti az 20 °C on mért szilárdságot. A kezdeti, illetve a maximális szilárdság és a 800 °C-ig mért szilárdság aránya lényegesen kedvezőbb a közönséges betonhoz képest. Ez elsősorban az adalékanyag nagy porozitásával (67%) és nyitott pórusszerkezetével indokolhatjuk. Az M3 beton érzékenyebben reagált a hőterhelésre ezt az eltérő cement típus és az eltérő cementmennyiséggel lehet magyarázni.

Az M3 betonnál az M5 érzékenyebben reagált a hőmérséklet emelkedésére ezt a műanyagszálak adagolásával tudjuk magyarázni.

Az M2 és M4 beton esetén (nagyobb szilárdságú adalékanyaggal készült) kezdeti kis szilárdságcsökkenést figyelhetek meg. A relatív nyomószilárdság 150 °C és 500 °C között közel állandó értéket mutat. A cementkő és az adalékanyag hőtágulása miatt az adalékanyag szemcsék és a cementkő határfelületén mikro repedések keletkeznek 500 °C-ig a nyomószilárdság értékei csökkenő tendenciát mutatnak. A betononszilárdság csökkenése 550 °C-ig megközelítőleg 20 %. A szilárdságcsökkenést 450 °C – 550 °C között a portlandit bomlása, valamint az adalékanyag és a cementkő eltérő hőtágulása okozza. 500 °C fölött további szilárdságcsökkenést figyeltek meg, amit a CSH-vegyületek átalakulása okoz. A 800 °C-os hőterhelést követően a legnagyobb szilárdságú adalékanyag (M2) esetén a próbatestek felhasadtak ezért 0-ra vettük a nyomószilárdság értékét.



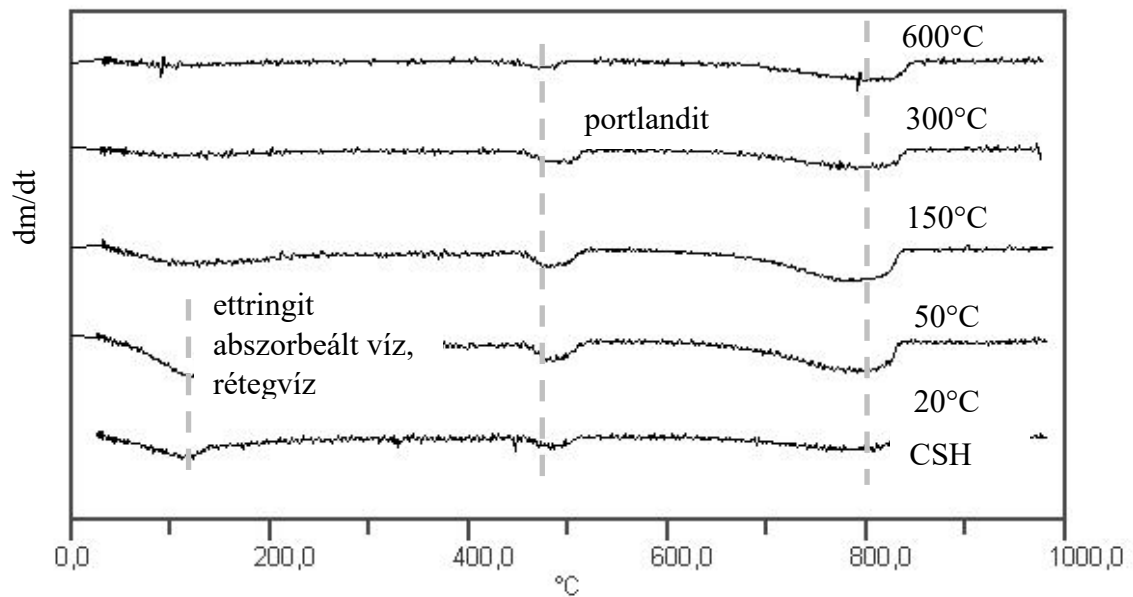
2.15. ábra: relatívnyomószilárdság változás a hőterhelés függvényében

(A nyomószilárdság átlagértéke 20 °C-on az M1: 27,5 N/mm², M2: 53,23 N/mm², az M3: 36,1 N/mm², az M4: 46,3 N/mm², M5:34,5 N/mm² volt.)

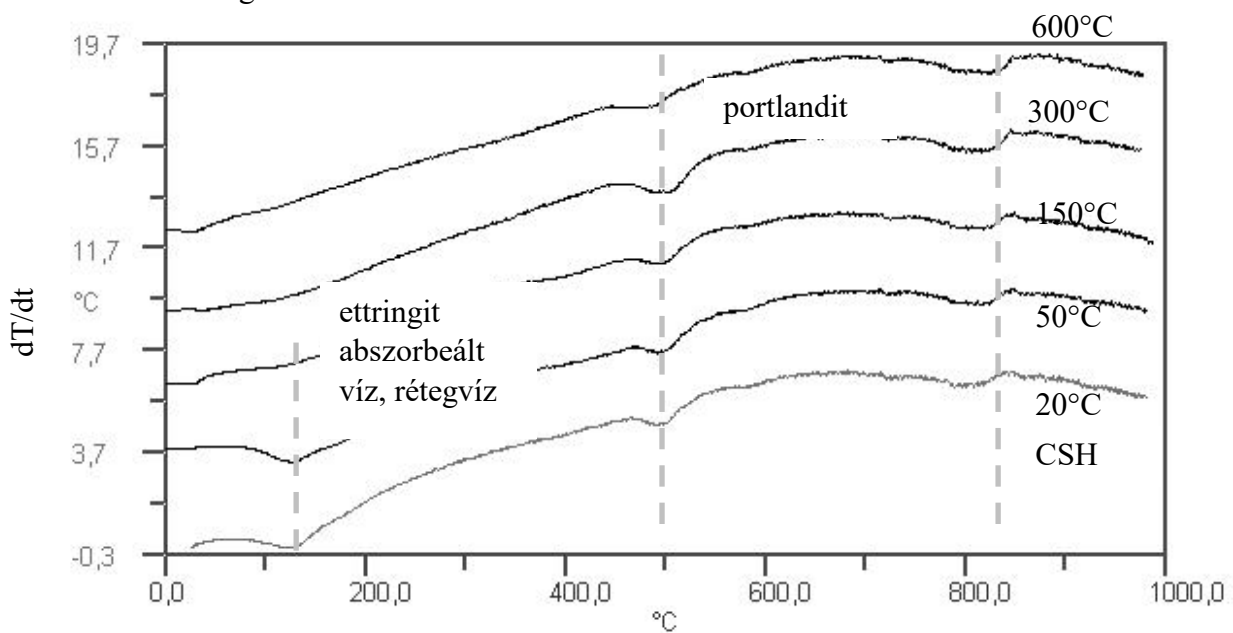
A vizsgálatok során bekövetkező fázisátalakulások is bizonyítják(2.16 ábra). A termonalitai vizsgálatok alapján jól látható DTG csúcsok jelentkeznek az ettringit (100°C), a monoszulfát (190°C), a portlandit (500°C), a kalcit (760°C) és a kalcium-szilikát-hidrátok (820°C) átalakulásánál. Az ettringitnél jelentkező csúcs nagyságát magyarázza az abszorbeált víz, illetve a rétegvíz távozáskor bekövetkező tömegveszteség. A kvarc átkristályosodása nem jár tömegváltozással, ezért az csak a DTA görbéken figyelhető meg. A kvarc jelenléte a beton homoktartalmával magyarázható.

Általánosságban megállapítható, hogy a könnyű adalékanyagos betonok 500 °C-os hőmérsékletig kedvezőbben viselkednek mint a kvarckavics adalékanyagú betonok. Az adalékanyagok tekintetében megállapíthatjuk, hogy az 5N-es (kisebb szilárdság adalékanyaggal) viselkedett a legkedvezőbben (M1, M3) a legkedvezőtlenebb a 8F-es (legnagyobb adalékanyag szilárdság) (M2) volt.

DTG-görbék (dm/dt , $mg/^\circ C$)



DTA-görbék



2.16. ábra: Duzzasztott agyagkavics adalékanyag (5N) készült beton DTG- és DTA-görbéi

2.3 Betonok és könnyűbetonok hővezetési tényezője

A hővezetési tényező épületfizikai, épületenergetikai számítások végzése során a legfontosabb anyagjellemző, mellyel állandósult állapotot feltételező egyszerű számítások során az adott építőanyagot figyelembe vehetjük egy épületszerkezet a hővezetési ellenállásának, illetve hőátbocsátási tényezőjének meghatározásához.

A hővezetési tényező jele λ (amerikai szakirodalmakban k jelöléssel is találkozhatunk), mértékegysége $W/(m \cdot K)$, mely a $(J \cdot m)/(s \cdot m^2 \cdot K)$ fizikai tartalom egyszerűsített megadásából ered. A hővezetési tényező megadja, hogy egységnyi idő alatt egységnyi felületen keresztül egységnyi hőmérsékletkülönbség hatására egy egységnyi vastagságú anyagon mennyi hőenergia képes átjutni. A hővezetési tényező fogalmának levezetését az *MSZ EN ISO 7345* szabvány tartalmazza.

A mérnöki gyakorlatban a hővezetési tényezővel írjuk le az anyagokon keresztüli hőátvitel mindhárom komponensét (hővezetés, hőátadás és hősugárzás) is, mivel az számítások során az épületszerkezetek és szilárd építőanyag alkotóik esetében azokat sok esetben homogénnek és izotrópnak egyszerűsítjük, valamint a hőátvitelt szilárd testekben lejátszódó hővezetésként modellezzük. Ezért a komponenseket jelen esetben is együttesen vizsgáljuk és mérjük, valamint a hőtechnikával foglalkozó szakirodalmakban is általában együttesen kezelik.

Az anyagok hővezetési tényezője függ a hőmérséklettől és nedvességtartalomtól, valamint az anyagok korától is. A laboratóriumban meghatározott kijelentett (vagy más néven deklarált) hővezetési tényezőket a tényleges beépítésnek megfelelő környezeti állapotok alapján tervezési értékekre kell átszámítani. A közölt tervezési értékek környezeti állapotait, valamint a közölt értékből tervezési értékekre történő átszámításhoz alkalmazható hőmérséklet- és nedvességszámítási tényezőket és módszertant az *MSZ EN ISO 10456* szabvány írja le.

Több, hazánkban is hatályos szabvány tartalmaz tervezési hőtechnikai értékeket általános építőipari felhasználás esetére. A jelenleg hatályos hőtechnikai szabványok közül az *MSZ 24140* és *MSZ EN ISO 10456*, valamint az betonszerkezetek tűzhatásra történő tervezésével foglalkozó *MSZ EN 1992-1-2* szabványt mutatjuk be.

Az *MSZ 24140* szabvány a betonok hővezetési tényezőjét 2 W/mK értéken adja meg („kavicsbeton”), melyhez 2200 kg/m^3 testsűrűség tartozik, míg a könnyűbetonok esetén tartalmaz polisztirolbetont, mely 400 kg/m^3 testsűrűség esetén $0,08 \text{ W/mK}$ hővezetési tényezővel vehető figyelembe. E mellett kétféle testsűrűségű perlitbeton található a

szabványban, 500 kg/m^3 és 1200 kg/m^3 testsűrűséggel, előbbi $0,16 \text{ W/mK}$, míg utóbbi $0,47 \text{ W/mK}$ hővezetési tényezővel szerepel.

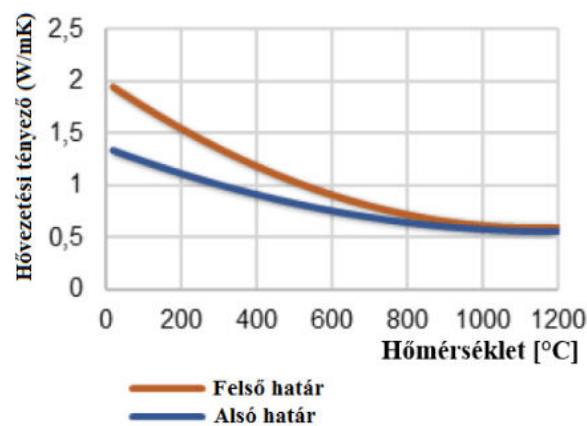
Az *MSZ EN ISO 10456* szabvány a betonokat szintén testsűrűségük szerint differenciálva adja meg, azonban könnyűbetonokat nem tartalmaz. A szabványban megadott hővezetési tényezők 1800 kg/m^3 testsűrűség esetében $1,15 \text{ W/mK}$, 2000 kg/m^3 testsűrűségnél $1,35 \text{ W/mK}$, 2200 kg/m^3 testsűrűség esetében $1,65$ és 2400 kg/m^3 testsűrűség esetén 2 W/mK .

Az *MSZ EN 1992-1-2* szabvány a betonok hővezetési tényezőjének alsó és felső határát adja meg a hőmérséklet függvényében. Az egyenletek a következők:

$$\lambda_{c,\text{felső}} = 2 - 0.2451 \cdot (\theta/100) + 0.0107 \cdot (\theta/100)^2$$

$$\lambda_{c,\text{alsó}} = 1.36 - 0.136 \cdot (\theta/100) + 0.0057 \cdot (\theta/100)^2$$

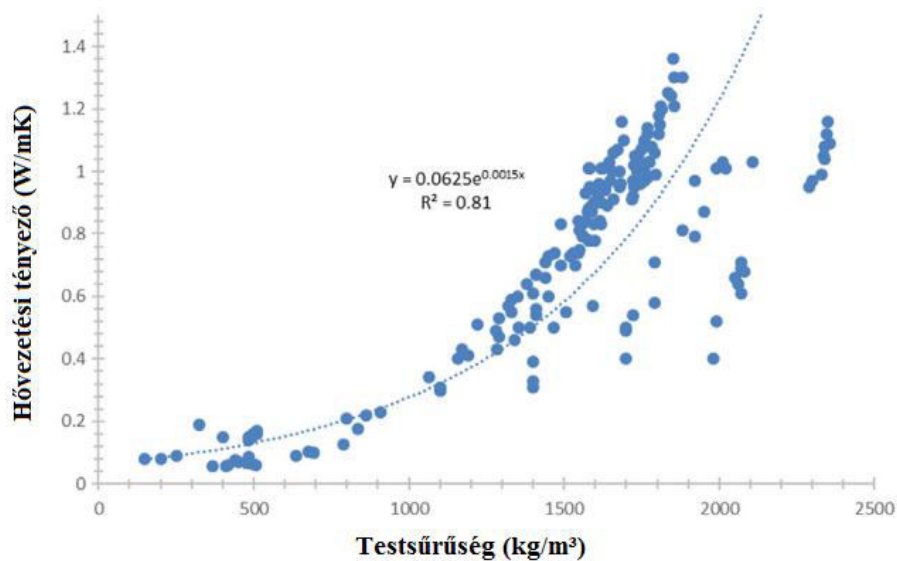
Az *MSZ EN 1992-1-2* szabványban megadott hővezetési tényező egyenlet a 2.17-es ábrán látható.



2. 17. ábra: A beton hővezetési tényezőjének viselkedése magas hőmérsékleten az *MSZ EN 1992-1-2* alapján (Nagy és Szagri, 2018)

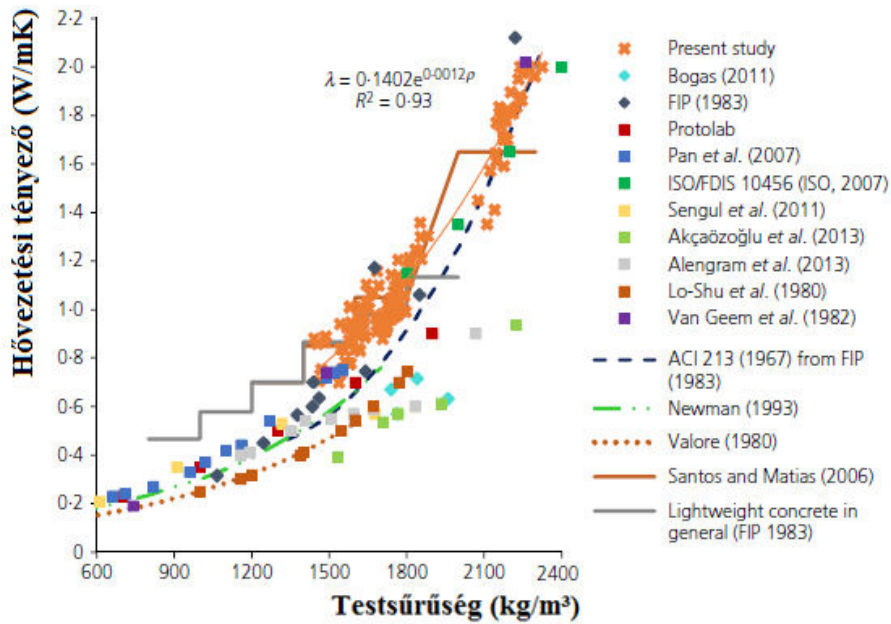
A nemzetközi szakirodalomban számos tanulmány foglalkozik a betonok, illetve a könnyűbetonok hővezetési tényezőjével. Ezen tanulmányokban a betonokat különféle összetétellel, változó adalékanyagokkal, eltérő testsűrűségekkel, különböző hőmérsékleten és nedvességtartalommal vizsgálták, többféle mérési módszer alkalmazásával a kutatók. A számos mérési eredményt *Asadi és társai* összesítették, majd meghatároztak egy közelítő egyenletet, mely alapján a betonok testsűrűségének ismeretében becsülhetjük a hővezetési tényezőt. Az egyenlet és a betonok testsűrűségének, illetve hővezetési tényezőjének

összefüggése a 2.18-as ábrán látható. Az ábrán megfigyelhetjük, hogy a betonok hővezetési tényezője exponenciálisan nő a testsűrűség növekedésével.

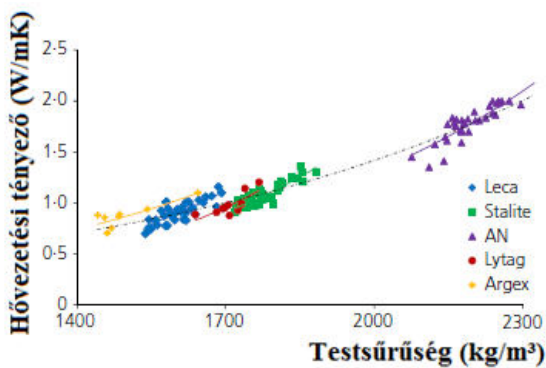


2.18. ábra: Betonok testsűrűségének és hővezetési tényezőjének összefüggése (Asadi, Shafiqh, Hassan és Mahyuddin, 2018)

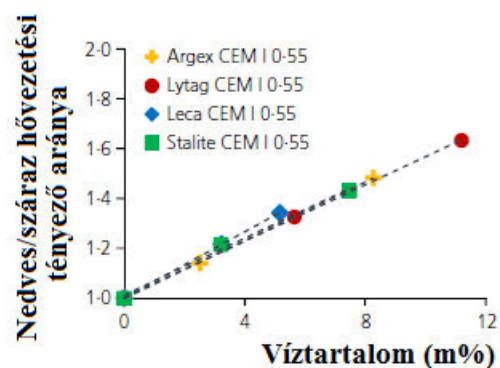
Szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezőjével, valamint szakirodalmakban és szabványokban található mérési eredmények összehasonlításával foglalkoztak *Real és társai*, kutatásuk során szintén meghatározták testsűrűség függvényében a hővezetési tényező becslésére alkalmazható összefüggést, mely során a betonok száraz testsűrűségének ismeretében a száraz hővezetési tényező határozható meg. Az összefüggés a 2.19-es ábrán látható. Kutatásukban továbbá vizsgálták a különféle könnyű adalékanyagok (pl. Argex, Leca, Lytag és Stalite) hatását is, mely szintén visszavezethető a felhasználásukkal előállított betonok testsűrűségére, lásd 2.20-as ábra. Kutatásuk során megállapították, hogy a víz-cement tényező befolyásolja a szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezőjét, emelkedésével csökkenhet a hővezetési tényező. Vizsgálták továbbá a száraz és eltérő víztartalmú szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezőjének arányát is, melyet a 2.21-es ábrán mutatunk be. Az ábrán látható, hogy a különböző könnyű adalékanyagokkal készített betonok eltérő maximális víztartalommal rendelkeznek, valamint látható, hogy a víztartalom minden esetben jelentősen, akár 1,6-szorosára is növelheti a szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezőjét. Mivel a valóságban a betonból készült szerkezetek még légszáraz állapotukban is mindig tartalmaznak valamennyi nedvességet, ezért a nemzetközi szakirodalmakban leggyakrabban megtalálható, kedvező és alacsony száraz hővezetési tényezők kevésbé reprezentálják a valós felhasználásnál tapasztalható hőtechnikai viselkedést.



2.19. ábra: Szerkezeti könnyűbetonok és betonok testsűrűségének és hővezetési tényezőjének összefüggése (Real, Bogas, Gomes és Ferrer, 2015)



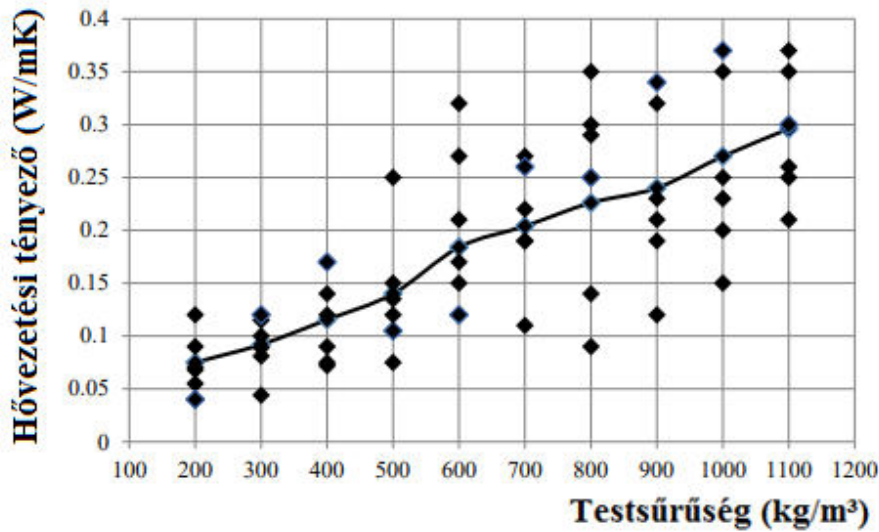
2. 20. ábra: Szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezője az adalékanyag típusa és a beton testsűrűségének függvényében



2. 21. ábra: Szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezője az adalékanyag típusa és a beton víztartalma függvényében

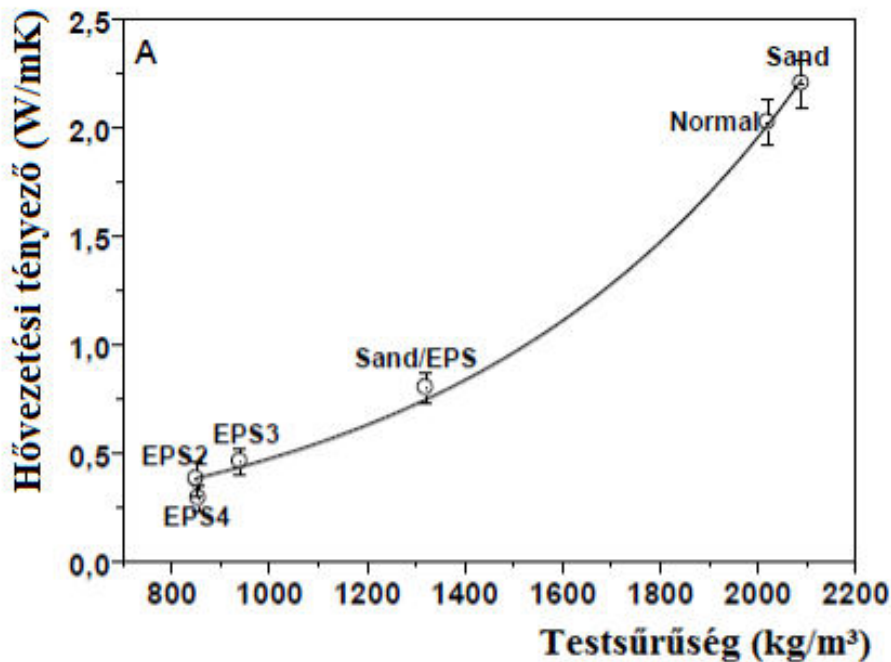
(Real, Bogas, Gomes és Ferrer, 2015)

Polisztirolhab adalékos, szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezőjével többek között Kharum és Svintsovfoglalkoztak, kutatásuk során a 2.22-es ábrán látható hővezetési tényezőket mérték. Kutatásukban továbbá vizsgálták az anyagok nyomószilárdságát is, mely 1100 kg/m³ testsűrűség esetén mindössze 4-4,5 N/mm² között alakult.



2. 22. ábra: Polisztirol adalékanyagos betonok testsűrűségének és hővezetési tényezőjének összefüggése (Kharum és Svintsov, 2017)

Magasabb testsűrűségű, újrahasznosított polisztirolhab adalékanyagos könnyűbetonok hővezetési tényezőjét ábrázoltuk a 2.23-as ábrán Petrella, Di Mundo és Notarnicola kutatása alapján. A vizsgálatukban szereplő 1320 kg/m³ testsűrűségű, homok és expandált polisztirolhab adalékanyagos beton hővezetési tényezőjét 0,8-0,85 W/mK között mérték, melynek nyomószilárdsága 28 napos korban 33 N/mm²-re adódott.



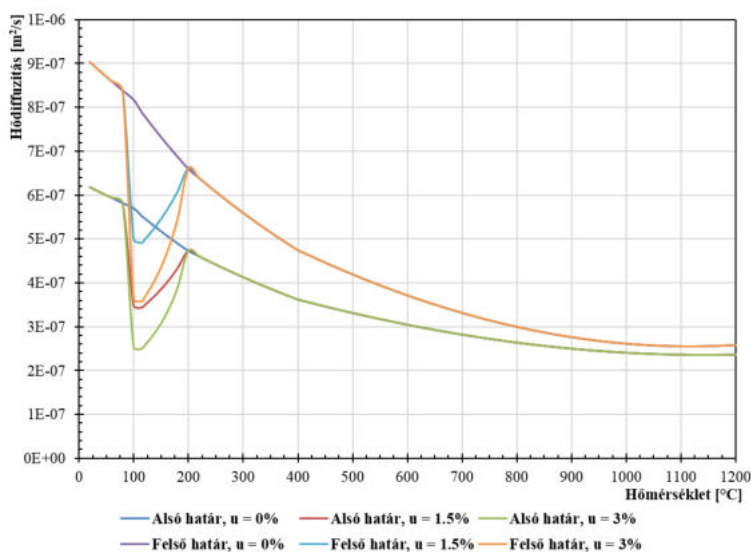
2.23. ábra: Polisztirol adalék betonok testsűrűségének és hővezetési tényezőjének összefüggése (Petrella, Di Mundo és Notarnicola, 2020)

Az előbbieken bemutatott kutatások alapján általánosan kijelenthető, hogy a szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezője nő a testsűrűség valamint a nyomószilárdság emelkedésével, csökken a víz-cement tényező emelésével, továbbá a betonok hővezetési tényezőjére jelentős hatással van a hőmérséklet és a víztartalom is.

Tűzeset szerkezetekre gyakorolt hatásának és a szerkezetek felmelegedésének modellezése esetén a hővezetési tényezőn túl a testsűrűség, valamint a fajlagos hőkapacitás ismerete szükséges. Az építőanyagok hődiffúziója az *MSZ EN ISO 7345* alapján a hővezetési tényező osztva a sűrűséggel és a fajlagos hőkapacitással.

A betonok fajlagos hőkapacitását az *MSZ EN ISO 10456* szabvány 1000 J/kgK értéknek adja meg, míg az *MSZ 24140* szabvány polisztirolbetonokra 1050 J/kgK-t, míg kavicsbetonra 840 J/kgK értéket tartalmaz. A polisztirolbetonok magasabb fajlagos hőkapacitása az expandált polisztirol adalékanyag 1460 J/kgK-es értékével magyarázható, minél több polisztirol adalékanyagot teszünk a betonba, annál magasabb lesz annak fajlagos hőkapacitása. Azonban a polisztirol adalékanyaggal jelentős mértékben csökkenthetjük a beton testsűrűségét, ezáltal pedig a térfogati hőkapacitást is csökkentjük, ami a testsűrűség és fajlagos hőkapacitás szorzata.

Az *MSZ EN 1992-1-2* szabvány a betonok testsűrűségére és fajlagos hőkapacitására is tartalmaz hőmérséklet és nedvességtartalom-függő egyenleteket. Az egyenleteket felhasználva a betonok hődiffúziója is meghatározható, melynek alakulása a 2.24-es ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a betonok hődiffúziója a hőmérséklet emelkedésével csökken.



2.24. ábra: A beton hődiffúziójának változása magas hőmérsékleten az MSZ EN 1992-1-2 alapján (Nagy és Szagri, 2018)

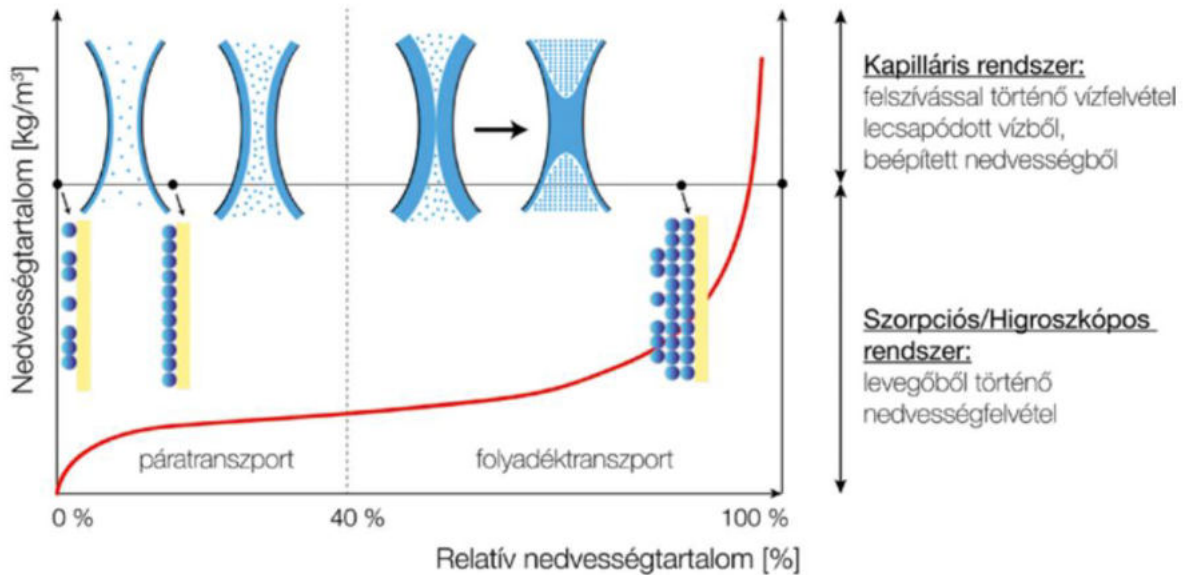
2.4 Betonok és könnyűbetonok higroszkopikus szorpciós izotermája

A higroszkopikus szorpciós izoterma megmutatja, hogy meghatározott, állandó hőmérsékleten (izotermikusan, tehát a folyamat közben a rendszer hőmérséklete nem változik), valamint állandó relatív légnedvességtartalmú (páratartalmú) terekben tárolva mekkora egyensúlyi nedvességtartalom alakul ki egy porózus anyagban az egyes eltérő relatív légnedvesség értékek esetében higroszkópos (levegőből történő) adszorpció (nedvességmegkötés) útján.

Amennyiben a nedvességfelvétel helyett a nedvességleadást vizsgáljuk, deszorpciós izotermáról beszélhetünk. A nedvességtartalmat leggyakrabban tömegszázalékban (m%) adjuk meg, míg a relatív légnedvességtartalmat százalékban, vagy 0-1 közötti számmal reprezentáljuk, ahol a 100%, illetve 1 jelenti a telített, míg 0% vagy 0 érték a teljesen száraz levegőt. Az alacsony és magas tartományokban a relatív légnedvességtartalom mérésének komplexitása miatt a szorpciós izotermákat általában 10-97% közötti relatív légnedvességtartalom között vizsgáljuk.

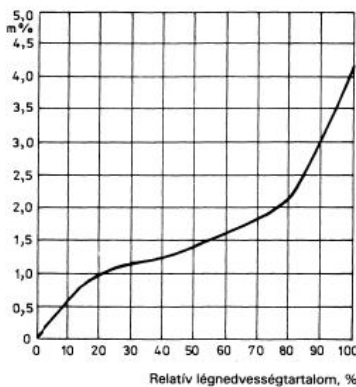
A Magyarországon bevezetett, és érvényes szabványok közül egyedül az *MSZ 24140* tartalmaz szorpciós nedvességtartalmakat beton, illetve polisztirolbeton anyagokra, azonban a feltüntetett értékek a nemzetközi szakirodalom alapján rendkívül alacsony. A maximális nedvességtartalom (a szabvány 100%-os relatív páratartalommal jelöli, ilyen páratér kialakítása, fenntartása és a valóságban nem lehetséges), valamint nem közölt hőmérsékleten 4,1 m% (92,4 kg/m³ víztartalom), míg polisztirolbeton esetén mindössze 3,6 m% (14,4 kg/m³ víztartalom). Ez alapján látható, hogy a szabvány szerint a polisztirolbeton mintegy 6,5-szer kevesebb nedvességet képes felvenni közel 100%-os relatív légnedvesség esetén. A szorpciós izotermák vizsgálatánál azonban nem csupán a maximális higroszkopikus nedvességfelvételt szükséges vizsgálni, hanem a differenciális nedvességkapacitás változását is érdemes szemügyre venni. A differenciális nedvességkapacitás egy adott relatív légnedvességtartalom melletti nedvességfelvevő képességet mutatja meg, azaz a szorpciós izoterma meredekségét egy adott relatív légnedvesség esetén. Előállításához differenciálnunk kell a szorpciós izotermát a relatív légnedvességtartalom szerint. Továbbá fontos információ a szorpciós izoterma alakja, valamint a megfigyelhető meredekségváltozások, inflexió pontok is, melyek különféle nedvességtranszport folyamatok bekövetkezését mutatják, lásd a 2.25-ös ábrát. A

szorpciós izotermán megfigyelhető a monomolekuláris réteg, majd a multimolekuláris réteg felépülése az anyag kapillárisaiban melyeket kezdetben a páratranszport jellemez. Ezt követően kialakulhat kapilláris kondenzáció, melynek bekövetkezte a szorpciós izoterma meredekségváltozásával állapítható meg, és ezen szakasz után kezd a folyadéktranszport dominánssá válni.

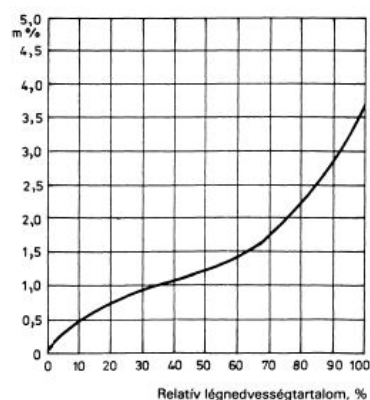


2. 25. ábra: Szorpciós izoterma (Nagy, Szagri és Tóth, 2017)

Betonokra vonatkozó szorpciós izotermák grafikusán ábrázolva az MSZ 24140 szabvány mára visszavont elődében, az MSZ 04-140/2-ben voltak megtalálhatók, melyeket a 2.24-es és 2.25-ös ábrán mutatunk be.

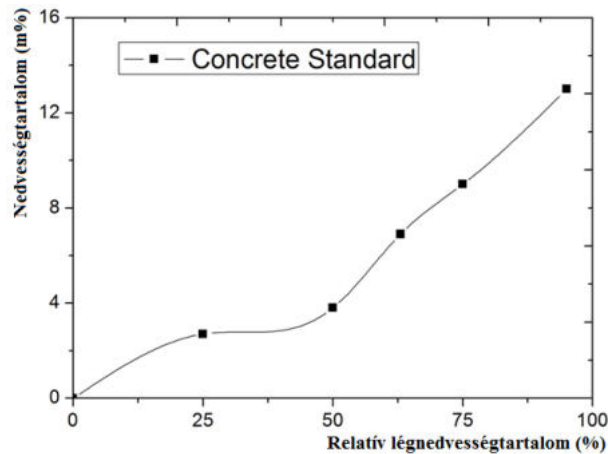


2. 25. ábra: Kavicsbeton szorpciós izotermája a visszavont MSZ 04-140/2 szerint



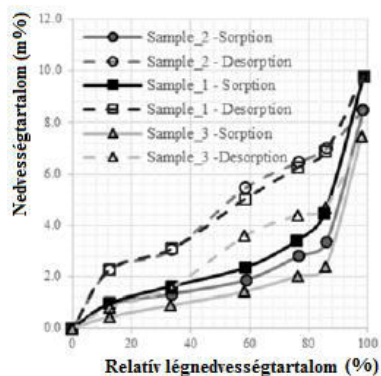
2. 26. ábra: Polisztirolbeton szorpciós izotermája a visszavont MSZ 04-140/2 szerint

500 kg/m³száraz testsűrűségű könnyűbeton szorpciós izotermáját vizsgálta *Lakatos*, és kutatásában a 2.25-ös ábrán látható görbét határozta meg az *MSZ 04-140/2* alapján, melyen látható, hogy a betonok maximális higroszkopikus úton felvett nedvességtartalma 13 m% volt. Ez az érték 65 kg/m³ nedvességtartalomnak felel meg. Az ábrán látható továbbá, hogy a nedvességfelvétel 50% relatív légnedvességtartalom felett növekszik meg jelentősen.

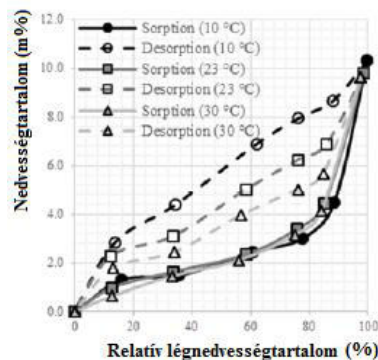


2.27. ábra: Könnyűbeton higroszkopikus szorpciós izotermája (*Lakatos, 2014*)

Könnyűbetonok szorpciós izotermájával foglalkozott *Orosz, Nagy és Tóth* kutatása, melyben 200 kg/m³-nél alacsonyabb, ultrakönnnyű polisztirolgyöngy adalékos betonok higrotermikus anyagtulajdonságait vizsgálták. A 2.28-as ábrán láthatók a vizsgált ultrakönnnyű betonok szorpciós, valamint deszorpciós izotermája, melyen látható, hogy az egyensúlyi nedvességtartalom 97% relatív légnedvességtartalom mellett 23 °C fokon megközelítheti a 10 m%-ot is. Ez az érték természetesen abszolút nedvességtartalomban kifejezve lényegesen kevesebb nedvességet jelent az anyagban (kevesebb, mint 10 kg/m³), mint a 10-szer nagyobb testsűrűségű, hagyományos betonokban. A 2.29-es ábrán pedig a szorpciós nedvességfelvétel és nedvességleadás hőmérsékletfüggése látható. A kutatás alapján kijelenthető, hogy nedvességfelvétel esetén nincs jelentős eltérés 10-30 °C között, azonban a deszorpciót a hőmérséklet jelentős mértékben befolyásolta.



2. 28. ábra: Szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezője az adalékanyag típusa és a beton testsűrűségének függvényében



2. 29. ábra: Szerkezeti könnyűbetonok hővezetési tényezője az adalékanyag típusa és a beton víztartalma függvényében

(Orosz, Nagy és Tóth, 2014)

3. KÍSÉRLETI MÓDSZER

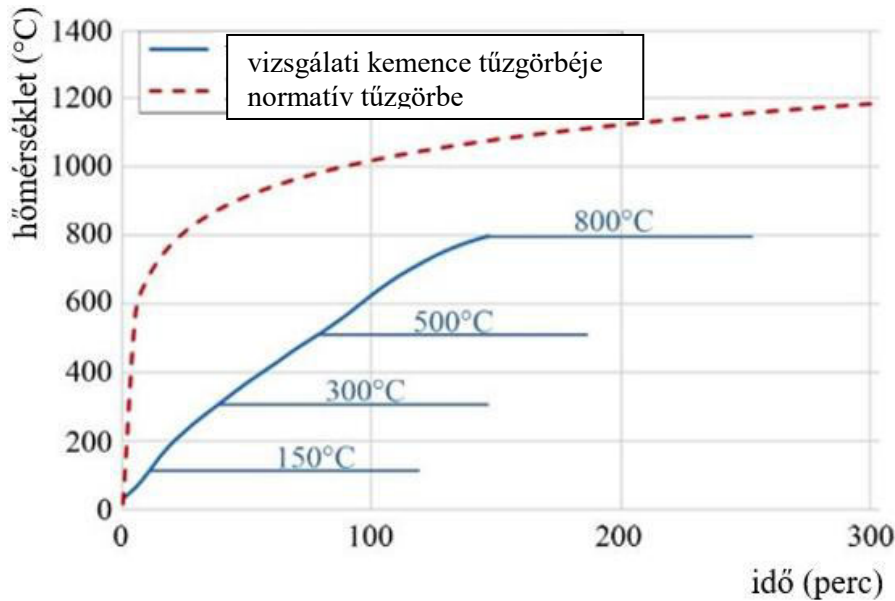
3.1 Tűzállóság

A hőterhelés előtt a próbatesteket 7 napig vízben, majd további 21 napig laborlevegőn tároltuk, ezután a próbatesteket elektromos kemencében hőterheltük. Az elektromos kemence felfűtési görbéje a 3.1. ábrán látható. Mérési eredményeink alapján a kemence tűzgörbéje eltér a normatív tűzgörbétől (*ISO 834 tűzgörbe, MSZ EN 1991:1-2*), de mivel a kemence felfűtése többszöri ellenőrzés során azonos volt, így alkalmazható a beton hőterhelést követő jellemzőinek összehasonlítására (Pákozdi, Lublói, Czoboly, 2015).

A vizsgálatok során a próbatestek minden esetben a kihűlt kemencébe kerültek elhelyezésre. A próbatestek elhelyezését követően a hőterhelés két szakaszra osztható:

- *felfűtési szakasz:* a 3.1. ábrán ismertetett felfűtési sebességgel;
- *maximális hőmérsékleten tartás:* a tervezett maximális hőmérséklet elérését követően a próbatesteket 2 órán keresztül azonos hőmérsékleten tartottuk, ahhoz, hogy az egész keresztmetszet teljes egészében átmelegedjen, a hőterhelés időtartamát derivatogramos vizsgálattal igazoltuk (Majorosné Lublói, 2008).

A hőterhelést követően a próbatesteket laborlevegőn hagytuk kihűlni. A próbatestek kihűlését követően végeztük el a vizsgálatokat. A vizsgálatokat megelőzően a kemencéből kivéve szemrevételeztük a próbatesteket.



3.1. ábra: A normatív tűzgörbe (MSZ EN 1991:1-2) és a vizsgálati kemence felfűtési görbéjének összehasonlítása a 2 órás hőn tartással (Pákozdi, Lublós, Czoboly, 2015)

Az alkalmazott hőlépcsők: 20 °C, 60 °C, 150 °C, 500 °C, 800 °C voltak.

3.2 Nyomószilárdság

A nyomószilárdság-vizsgálatokat az *MSZ 4798* szerint végeztük el.

A beton nyomó szilárdságát 150 mm élhosszúságú kockákon határoztuk meg. A nyomószilárdság-vizsgálatot ALPHA-3-3000 S törőgéppel végeztük el 11,25 kN/ssebességgel.

3.3 Hővezetési tényező

A hővezetési tényező-vizsgálatokat az *MSZ EN 12664* és az *MSZ EN 12667* szerint végeztük el permvédett segédfűtőlapos (guarded hot plate) eljárással.

A beton hővezetési tényezőjét 300 mm x 300 mm x 98,29-100,25 mm-es próbatesteken határoztuk meg. A vizsgálat előtt a próbatesteket laborlevegőn legalább 168 órán keresztül kondicionáltuk az *MSZ EN ISO 10456* szerinti I.b) környezeti állapotban (23 °C és 50% relatívleghézagtartalom). A hővezetési tényező vizsgálatát Taurus TLP 300 DTX hővezetési tényezőmérő-berendezéssel végeztük el, 8,6-8,7 K hőmérsékletkülönbség kialakításával és 9,8-10 °C mintaközéphemérsékleten. A vizsgálat során a próbatesteket 200 N nyomóerővel nyomtuk, mely a szenzorok rögzítése és a kontaktellenállás minimalizálása miatt szükséges. A közölt hővezetési tényezőt az *MSZ EN ISO 10456* szabvány I.b) szerinti környezeti állapotban számítottuk ki a mért eredmények felhasználásával.

3.4 Hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező

A beton hővezetési tényezőjének alkalmazásával az *MSZ EN ISO 6946* szerint meghatároztuk a hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező értékeket 10-60 cm falvastagság esetére.

3.5 Higroszkopikus szorpciós izoterma

A higroszkopikus szorpciós képesség vizsgálatát és a szorpciós izotermákat az *MSZ EN ISO 12571* szerint végeztük el exsikkátor módszer alkalmazásával.

A beton szorpciós izotermáját 28.8-29 mm vastagságú és 9-9.1 mm átmérőjű henger próbatesteken vizsgáltuk, melyeket a vizsgálat megkezdése előtt tömegállandóságig szárítottunk 65 °C-on az *MSZ EN ISO 12570* szerint. A szorpciós izoterma vizsgálathoz Novasina LabMaster-aw, valamint Radwag MAC 110 nedvességmeghatározó precíziós mérleg alkalmazásával végeztük el. A relatív légnedvességtartalmakat a LabMaster-aw berendezésben kálium-acetát (22%), magnézium-klorid (33%), nátrium-bromid (58%), nátrium-klorid (75%), kálium-klorid (86%) és kálium-szulfát (97%) telített sóoldatok alkalmazásával állítottuk elő. A mérést 23 °C-os állandó hőmérsékleten végeztük.

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

4.1 Szemrevételezés a tűzterhelés után

A próbatestek felületén 500 °C-os hőtermeléséig nem jelentek meg repedések.

A próbatesteket a hőterhelés után szemrevételeztük. A szemrevételezés során megállapítottuk, hogy a 800 °C-os hőterhelést követően a próbatestek felületén repedések keletkeztek (*4.1 ábra*) és a próbatestek a polisztirol kiégése miatt elszíneződtek.



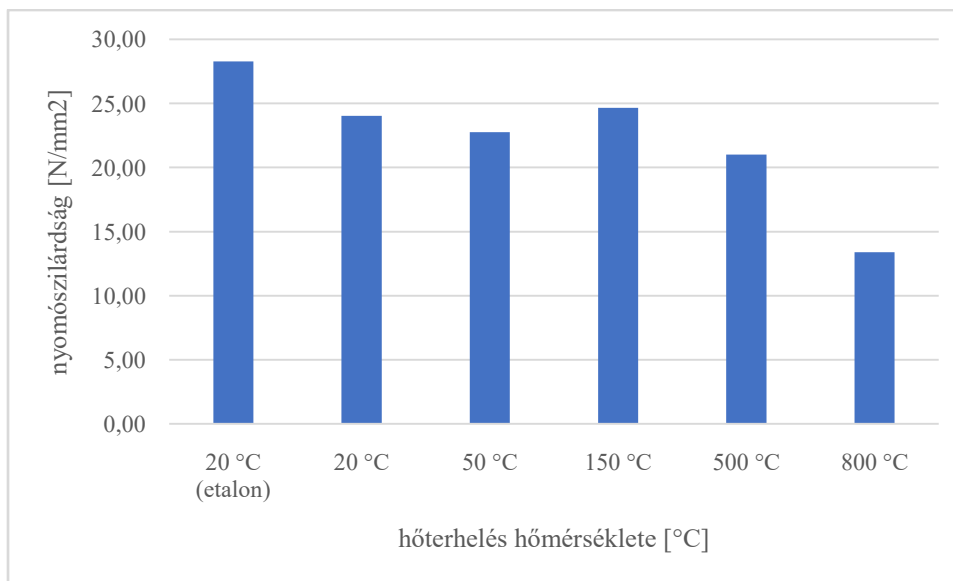
4.1 ábra: A próbatestek a 800 °C-os hőterhelést követően

4.2 Nyomószilárdság alakulása a hőterhelés után

A nyomószilárdság alakulását a 4.2 ábrán adjuk meg. A méréshez tartozó egyedi értékeket a 4.1 táblázat tartalmazza.

A 4.2 ábra alapján a következő megállapításokat tesszük:

- 150 °C -os hőterhelést követően nem következett be jelentős szilárdságcsökkenés,
- a 800 °C-os hőterhelést követően csak 50 % volt, ami a hagyományos betonét meghaladja, ahol a szilárdság csökkenés 80 % körül szokott lenni.



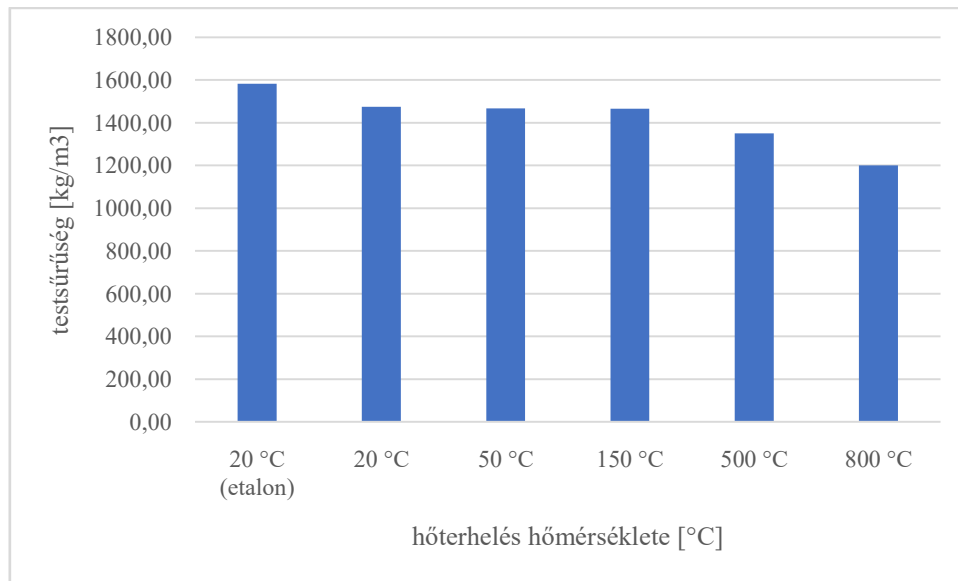
4.2 ábra: A nyomószilárdság alakulása a hőmérséklet függvényében

A nyomószilárdság vizsgálat után a törés képet elemeztük (4.4. ábra). A próbatestek törése során a hagyományos betonokra jellemző kúp szerű törésképet figyelhetjük meg, A hőmérsékletemelkedésével a törésvonalak egyre jobban közelítenek a függőlegeshez, a 800 °C-os hőterhelést követően majdnem megközelítik.

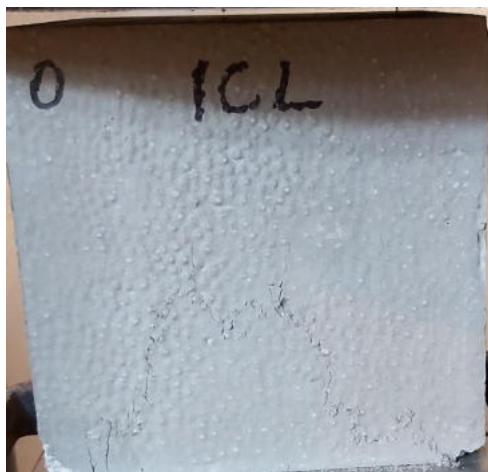
A nyomószilárdság alakulása mellett fontos a testsűrűség alakulása is ezt a 4.4 ábrán adjuk meg. A méréshez tartozó egyedi értékeket a 4.1 táblázat tartalmazza.

A 4.3 ábra alapján a következő megállapításokat tesszük:

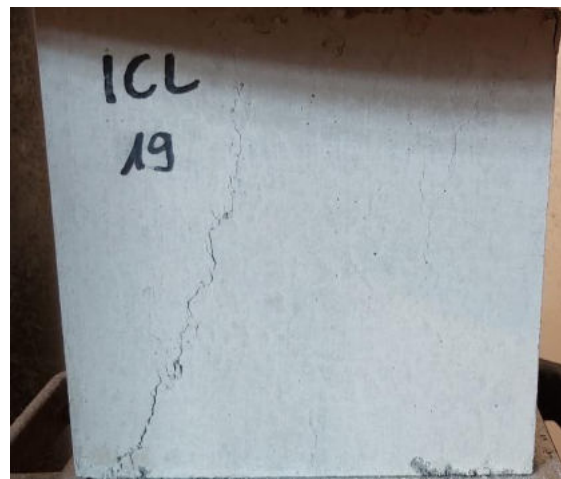
- 150 °C -os hőterhelést követően nem következett be jelentős testsűrűség csökkenés,
- a 800 °C-os hőterhelést követően csak 25 % volt, ami a hagyományos betonét kis mértékben meghaladja.



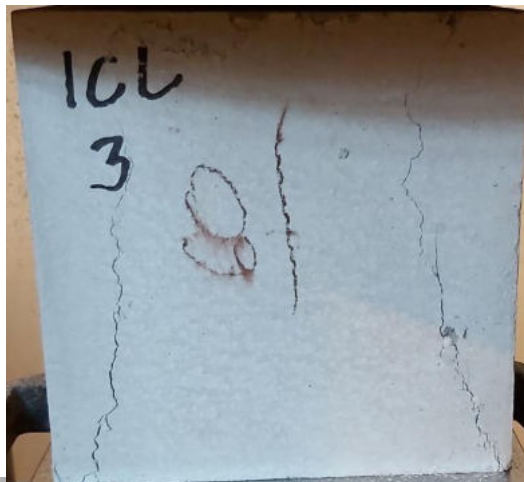
4.3 ábra: A testsűrűség alakulása a hőmérséklet függvényében



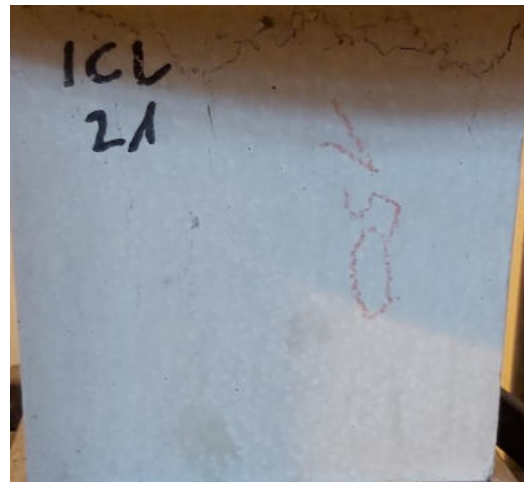
20 °C



20 °C



60 °C



150°C



500 °C



800

4.4 ábra: A törésképek a hőterhelést követően

4.3 Hővezetési tényező

A beton átlagos hővezetési tényezője 0,649 W/mK, míg a közölt hővezetési tényezője *MSZ EN ISO 10456* szabvány szerinti I.b) környezeti állapotban $\lambda = 0,7$ W/mK. A vizsgálati eredmények a 4.5-ös ábrán láthatóak.

Vizsgálati eredmények

Próba- testek ssz.	Vastagság, mm	Hőáram, W	Alsó oldal felületi hőmérséklete, °C	Felső oldal felületi hőmérséklete, °C	Hőmérséklet- különbség, K	Minta közép- hőmérséklete, °C	Hővezetési tényező, W/mK
1	100.25	0.559	5.5	14.2	8.7	9.8	0.6419
2	99.62	0.549	5.6	14.1	8.6	9.8	0.6389
4	98.29	0.585	5.7	14.3	8.6	10.0	0.6662

Hővezetési tényező átlagértéke (10 °C, $u_{23,50}$), W/mK: 0.6490

k2 együttható (n = 3, p = 90%, 1- α = 0,9): 4.26

A minta szórása, s: 0.0122

Közölt hővezetési tényező (10 °C, $u_{23,50}$), W/mK: 0.70

4.4 ábra: Hővezetési tényező vizsgálati eredmények és közölt hővezetési tényező

Az *MSZ EN ISO 10456* szabvány alapján a száraz beton közölt hővezetési tényezője 10 °C-on (azaz I.a) környezeti állapotban) 0,6 W/mK körül alakulhat, amennyiben a szabványban közölt polisztirol adalékanyagok betonokra megadott nedvességátszámítási-együtthatóhoz hasonlóan viselkedik a vizsgált beton a nedvességtartalom-változás esetén. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy a vizsgálatok során alkalmazott I.b) környezeti állapot a valóságos alkalmazást jobban reprezentálja. A nemzetközi szakirodalmi adatok alapján a mért beton hővezetési tényezője kedvezőnek mondható a szerkezeti könnyűbetonok csoportjában.

4.4 Hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező

Az alábbi ábrán az *MSZ EN ISO 6946* szabvány szerint számított hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező értékeket közöljük 10-60 cm falvastagság alkalmazása esetén:

	Alkalmazott falvastagság, cm					
	10	20	30	40	50	60
Hővezetési ellenállás, $R_{c,opp}$, m^2K/W :	0.14	0.29	0.43	0.57	0.71	0.86
Hőátbocsátási tényező*, U , W/m^2K :	3.20	2.19	1.67	1.35	1.13	0.97

*A számításához felhasznált hőátadási ellenállások az MSZ EN ISO 6946:2017 szabvány 7. táblázata szerint vízszintes irányú hőáramlás esetére $R_{si} = 0.13 m^2K/W$ és $R_{se} = 0.04 m^2K/W$.

4.5 ábra: Hővezetési ellenállás és hőátbocsátási tényező 10-60 cm falvastagság esetén

A számítások alapján kijelenthető, hogy a magyarországi homlokzati falakra vonatkozó hatályos $0,24 W/m^2K$ -es hőátbocsátási tényező követelményeknek (7/2006. TNM rendelet) 30 cm falszerkezet esetén 14 cm külső oldali EPS 80 kiegészítő hőszigeteléssel felel meg.

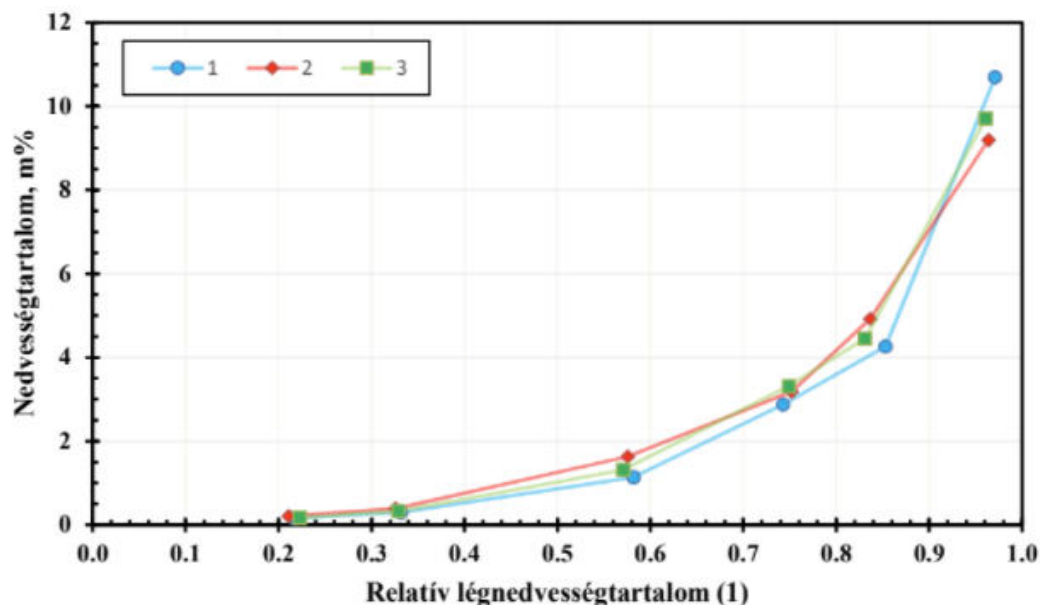
4.5 Higroszkopikus szorpciós izoterma

A beton higroszkopikus szorpciós izoterma vizsgálat eredményeit a 4.6-os ábrán foglaltuk össze.

Próba- testek ssz.	Vastagság h mm	Átmérő d mm	m_{nitra} g	Vizsgálati eredmények																	
				22% ($K_2H_2O_2$)			33% ($MgCl_2$)			58% ($NaBr$)			75% ($NaCl$)			84% (KCl)			97% (K_2SO_4)		
				aw_{11}	m_{11}	u_{11}	aw_{33}	m_{33}	u_{33}	aw_{58}	m_{58}	u_{58}	aw_{75}	m_{75}	u_{75}	aw_{84}	m_{84}	u_{84}	aw_{97}	m_{97}	u_{97}
1	28.8	9.1	7.545	0.217	7.557	0.16	0.332	7.568	0.30	0.582	7.631	1.14	0.743	7.762	2.88	0.853	7.867	4.27	0.971	8.352	10.70
2	29.0	9.0	7.654	0.211	7.670	0.21	0.326	7.684	0.39	0.576	7.779	1.63	0.752	7.898	3.19	0.837	8.031	4.93	0.964	8.358	9.20
3	29.0	9.1	8.062	0.223	8.076	0.17	0.329	8.089	0.33	0.571	8.168	1.31	0.749	8.329	3.31	0.831	8.421	4.45	0.961	8.845	9.71
átlag						0.18		0.34		1.36		3.13		4.55		9.87					

4.6. ábra: Higroszkopikus szorpciós izoterma vizsgálati eredmények

A vizsgálati eredmények grafikusán ábrázolva a következőképpen alakulnak:



4.6. ábra: Higroszkopikus szorpciós izoterma vizsgálati eredmények ábrázolása

Az ábrázolt szorpciós izoterma alakja megegyezik a nemzetközi szakirodalomban található könnyűbeton anyagok szorpciós izotermájával. A vizsgálat során meghatározott szorpciós izoterma alapján látható, hogy a maximális higroszkopikus nedvességfelvétel átlagosan 9,87 m%, melyből a száraz testsűrűség ismeretében az abszolút nedvességfelvétel meghatározható. A vizsgált beton a nemzetközi szakirodalomban található betonok és könnyűbetonok abszolút nedvességfelvétele között helyezkedik el. A vizsgálat alapján továbbá kijelenthető, hogy a beton nedvességtartalma 60%-osrelatív légnedvességtartalomig nem haladja meg a 2 m%-ot.

5. ÖSZEFoglalás

Az ICL Kft. megbízta a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékét, hogy elvégezze a cég által gyártott polisztirolbeton tűz, hő- és páratechnikai laborvizsgálata.

A feladat során a következő részfeladatokat végeztük el:

- próbatétesek kemencés hőterhelése és nyomószilárdság vizsgálata,
- hővezetési tényező mérése,
- higroszkopikus szorpciós izoterma meghatározása.

A próbatestek kemencés hőterhelése próbatétesek kemencés hőterhelése és nyomószilárdság vizsgálata alapján, megállapíthatjuk, hogy a vizsgált összetételű polisztirol beton jobban viselkedik, mint a hagyományos betonok, ezért **az MSZ EN 1992-1-2 szerint szabad a belőle épült szerkezeteket méretezni.**

A próbatestek hővezetési tényező vizsgálata alapján az épületek és épületszerkezetek épületfizikai és épületenergetikai számításai során a **vizsgálatban meghatározott közölt hővezetési tényezőt kell alkalmazni a vizsgált összetételű polisztirol betonok esetében.**

A próbatestek vizsgálata alapján kijelenthető, hogy a vizsgált összetételű polisztirol beton higroszkopikus szorpciós képessége a hagyományos betonoknál kedvezőbb.

6. IRODALOM

- 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról
- Asadi, I., Safigh, P., Hassan, Z.F.B.A., Mahyuddin, N.B. (2018): Thermal conductivity of concrete – A review, *Journal of Building Engineering*, Vol 20, pp. 81-93.
- Dorn, T. (1993): Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Trager-Stützen-Anschlüsse, Heft 99, Braunschweig
- Faust, T. (2000) Herstellung, Tragverhalten und Bemessung von konstruktivem Leichtbeton – Dissertation, *Universität Leipzig*
- Faust, T. (2003): Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau, Ernst und Sohn, 2003
- Hinrichsmeyer, K. (1987): Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton, Heft 74 IBMB, Braunschweig
- Horiguchi, T. (2005): Combination of Synthetic and Steel Fibres Reinforcement for Fire Resistance of High Strength Concrete, *Proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering*, 8.-9. Sept. 2005, Graz, pp.: 59-64
- ISO 834:2014 Fire resistance tests -- Elements of building construction -- Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements
- Kharum, M., Svintsov, A.P. (2017): Polystyrene concrete as the structural thermal insulating material, *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, Vol 4, Issue 10, pp. 40-45
- Khoury, G. A., et al. (2001): Fire Design of Concrete Materials structures and modelling, 1st fib Congress, Osaka, Japan, Oct. 2001
- Khoury, G. A., Grainger, B. N., Sullivan P. J. E., (1985): Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, *Magazine of Concrete Research*, Vol 37, No. 132
- Kordina, K (1997): Über das Brandverhalten punktgeschützter Stahlbetonbalken, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 479, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin

- Lakatos, Á. (2014): Analysis Of The Type Of The Sorption Isotherm Curves Of Different Materials, Proceedings of International Conference on Machine Learning, Electrical and Mechanical Engineering (ICMLEME'2014) Jan. 8-9, 2014 Dubai (UAE)
- Majorosné, Lublóy, É. (2008): Tűz hatása betonszerkezetek anyagaira, PhD értekezés, BME Építőmérnöki Kar, (tudományos vezető: Balázs L. Gy.), Budapest, p. 110.
- Mörth, W., Haberland Ch., Horvath J., Mayer A.,. (2005): Behaviour of Optimized Tunnel Concrete with Special Aggregates at High Temperature, Proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering 8.-9. Sept. 2005, Graz, pp.: 41-50
- MSZ 04-140/2:1991 Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai
- MSZ 24140:2015 Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai
- MSZ 4798-1:2004 Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon.
- MSZ EN 12664:2001 Építési anyagok és termékek hőtechnikai viselkedése. A hővezetési ellenállás meghatározása segédfűtőlapos és hőárammérős eljárással. Közepes és kis hővezetési ellenállású száraz és nedves termékek
- MSZ EN 12667:2001 Építési anyagok és termékek hőtechnikai viselkedése. A hővezetési ellenállás meghatározása segédfűtőlapos és hőárammérős eljárással. Nagy és közepes hővezetési ellenállású termékek
- MSZ EN 1992-1-2: 2005 Betonszerkezetek tervezése, Általános szabályok, Tervezés tűzterhelésre
- MSZ EN ISO 10456:2008 Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, illetve eljárások a közölt és tervezési hőtechnikai értékek meghatározására (ISO 10456:2007)
- MSZ EN ISO 12570:2000/A1:2013 Építési anyagok és termékek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A nedvességtartalom meghatározása megemelt hőmérsékleten való szárítással (ISO 12570:2000) 1. módosítás
- MSZ EN ISO 12571:2013 Építési anyagok és termékek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A higroszkopikus szorpciós tulajdonságok meghatározása (ISO

12571:2013)

MSZ EN ISO 6946:2017 Épületszerkezetek és épületelemek. Hővezetési ellenállás és hőátbocsátás. Számítási módszerek (ISO 6946:2017)

MSZ EN ISO 7345:2018 Épületek és épületszerkezetek hőtechnikai viselkedése. Fizikai mennyiségek és fogalm meghatározások (ISO 7345:2018)

Nagy, B., Szagri, D. (2018): Thermophysical behaviour of reinforced concretes, Proceedings of 6th International Conference of Contemporary Achievements in Civil Engineering, 20.04.2018, Subotica, Serbia, pp. 243-253

Nagy, B., Szagri, D., Tóth, E. (2017): Dinamikus hő- és nedvességtranszport szimulációk alapjai, Megtérülő Épületenergetika, 2017. január-február, pp. 33-39.

Nemes R. (2006): Habüveg adalékanyagok könnyűbetonok, PhD értekezés, Budapest

Niels H. P. (2005): Fire Design of Concrete Structures, proceedings of fibsymposium on Keep concrete attractive, edited by Gy. L. Balázs, A. Borosnyói, 23-25 May 2005, Budapest, pp.: 1097-1105

Pákozdi, Cs., Lublós, É., Czoboly, O. (2015): Kombinált tűzvédelmi burkolatok, Építőanyag, vol. 67. No 3 pp. 94-97.

Petrella, A., Di Mundo, R., Notarnicola, M. (2020): Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates, Materials, Vol 13, Issue 4, 988

Real, S., Bogas, J.A., Gomes, M.d.G, Ferrer, B. (2015): Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete, Magazine of Concrete Research, Vol 68, Issue 15, pp. 798-808

Richtlinie (2005): Erhöhter Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke, Wien, ÖVBB

Romić S., Lazić M., (1985): Armiranilakoagregati beton» IRO Gradevinskaknjiga, Beograd

Schneider U., (1986): Properties of Materials at High Temperatures, Concrete RILEM Publ., 2nd Edition, Gesamthochschule Kassel, Universität Kassel, 1986

- Schneider U., Weiß R. (1977), „Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen, Cement and Concrete Research, Vol 11, pp. 22-29
- Silfwerbrad J. (2004): Guidelines for preventing explosivespalling in concrete structures exposed to fire, Proceedings of Keep Concrete Attractive, Hungarian Group of fib. 23 25
- Thielen, K., Ch. (1994): Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling, (Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung □ Versuche und Modellbildung), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437, ISSN 0171-7197, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Ujhelyi J. (1995) Mesterséges adalékanyagok felhasználásával készülő könnyűbetonok technológiájának kidolgozása ÉTI-jelentés 6. Budapest, 1959
- Ujhelyi J. (2005): Műszaki előírás – Beton és vasbeton készítése (MÉASZ ME-04.19:1995) 14. fejezet Könnyűbetonok, Magyar Építőanyagipari Szövetség, Budapest
- Walter, R., Kari H., Kutserle W., Lindlbauer W. (2005): Analysis of the Load-bearing Capacity of Fibre Reinforced Concrete During Fire, proceedings of Central European Congress on Concrete Engineering, 8.-9. Sept. 2005 Graz, pp.: 54-59
- Waubke, N. V. (1973): Übereinen physikalischen Gesichtspunkt der Festigkeitsverluste von Portlandzementbetonen bei Temperaturen bis 1000°C Brandverhalten von Bauteilen, Dissertation, TU Braunschweig
- Winterberg R., Dietze, R., (2004): Efficient passive fire protection systems for high performance shotcrete, Proceeding for the Second International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Cairns, Australia, October, 2004 ISBN: 0415358981
- Zhang, M., H Gjørv O. E. (1990): Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, Cement and Concrete Research, Vol 20, pp. 32-38