



**Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri
Konferencia
2023.**



**Hulladék téglá- és üvegpórá alkalmazása cement helyettesítő
anyagként**

Készítette: Badacsonyi Nikolett

Témavezető: dr. Kristófné dr. Makó Éva, Óze Csilla

Mérnöki kar, Anyagmérnöki Intézeti Tanszék

A pályamunka lezárásának dátuma: 2023. 11. 03.

Absztrakt

A cement a világon az egyik legnagyobb mennyiségben gyártott és felhasznált építőanyag, a beton kötőanyaga. Előállítására számottevő ökológiai lábnyomot eredményez, gyártása során nemcsak üvegház hatású gázok kerülhetnek a természetbe, de alapanyagai is egyre korlátozottabb mértékben állnak rendelkezésre. A környezetterhelő hatását a legkönnyebben a felhasznált portlandcement kiváltásával, cementkiegészítő vagy helyettesítő anyagok alkalmazásával, tudjuk csökkenteni. Ezen anyagok többnyire más iparágból származó gyártási melléktermékek (pl. pernye, kohósalak), másnéven másodnyersanyagok, melyek egyrésze a széntüzelésű erőművek bezárásától és a bányák kitermelésétől függően hosszútávon nem lesz elérhető. Ezen anyagok helyett érdemes és fontos új helyileg hozzáférhető helyettesítő anyagok után kutatni.

Dolgozatomban vizsgálok magyarországi üveg- és téglahulladékok alkalmazhatóságát cement helyettesítő anyagként. A téгла- és az üveghulladékkal különböző mértékben (5, 10, 15, 20 és 25 m/m%) helyettesítettem a portlandcementet. Az így előállított kötőanyagoknak meghatároztam a vízigényét. Ezen kívül, kötőanyagpépet készítettem 0,3 víz/cement tényezővel, majd 28 napos korban vizsgáltam a megszilárdult pép Ca(OH)_2 tartalmát. A különböző mennyiségű téгла- és üvegport tartalmazó kötőanyagokkal szabványos habarcsot is készítettem, majd terülés mérésével jellemeztem annak bedolgozhatóságát. A habarcsokból szabvány szerint próbatesteket állítottam elő, melyekkel 28 napos korban vizsgáltam a kötőanyag hajlító- és nyomószilárdságát.

Meghatároztam, hogy helyettesítő anyagtól függetlenül annak tartalmának növelésével nőtt a kötőanyag vízigénye. A hulladék üvegpor adagolása növelte, míg a hulladék téglaporé csökkentette a habarcs terülését, így elmondható, hogy az üvegpor javította és a téglapor rontotta a habarcs bedolgozhatóságát. A 28 napos szilárdsági adatokat kiértékelve elmondható, hogy mindkét cement helyettesítő anyag csökkentette a kötőanyag hajlító- és nyomószilárdságát. Ugyanakkor, mindkét helyettesítő anyag 20 m/m%-os adagolásig teljesíti a mesterséges puccolánokra előírt szilárdsági követelményeket.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. Irodalmi összefoglaló	2
2.1. Cement [2-6].....	2
2.2. Cement hidratációja [3,6]	7
2.3. Cement helyettesítő anyagok [2,8]	8
2.4. Az üveg.....	11
2.5 Az agyagtégla	12
3. Kísérleti rész.....	14
3.1. Kísérlethez használt anyagok	14
3.1.1. Cement és homok.....	14
3.1.2. Kísérlethez használt üveg- és téglahulladék	16
3.2. A téгла- és üvegpor alkalmazása cement helyettesítő anyagként.....	18
3.2.1. Vízigény meghatározása	18
3.2.2. A megszilárdult kötőanyagpép fázisösszetételének vizsgálata.....	20
3.2.3. Bedolgozhatóság vizsgálata	22
3.2.4. Szilárdságvizsgálat.....	24
4. Összefoglaló	28

1. Bevezetés

A portlandcement az egyik legnagyobb mennyiségben használt kötőanyag, amelyből évente körülbelül 2 gigatonna kerül felhasználásra építkezéseknél. A cement nyersanyagainak (agyag és mészkő) őrlésével és égetésével keletkező portlandcementklinker gyártás a jelentős nyersanyagigény mellett csaknem 7%-kal járul hozzá a világ teljes ember eredetű CO₂ kibocsátásához. [1]

A cementgyártás környezetterhelő hatását leghatékonyabban a cement helyettesítő anyagok alkalmazásával csökkenthetjük. Helyettesítő anyagokként megemlíthetjük a cementekben is használt, olyan gyártási melléktermékeket (másodnyersanyagokat), mint például a granulált kohósalak, a pernye, a szilikapor. Azonban ezeknek a helyettesítő anyagoknak egyrésze a közeljövőben már nem lesz elérhető (pl. a pernye a széntüzelésű erőművek bezárásával), így szükséges az új helyettesítő anyagok kutatása. Ilyen célra alkalmasak lehetnek az olyan ipari hulladékanyagok, mint a téglá és az üveg, melyeket így nyersanyagok kiváltására tudunk használni. [1]

Dolgozatomban tanulmányozom magyar üveg- és téglahulladék hasznosíthatóságát cement helyettesítő anyagként. Vizsgálom a különböző mennyiségű helyettesítő anyagot tartalmazó kötőanyag vízigényét, a 28 napos megszilárdult kötőanyagpép portlandit tartalmát és a kötőanyagok 28 napos szilárdságát (hajlító- és nyomószilárdságát).

2. Irodalmi összefoglaló

2.1. Cement [2-6]

A kötőanyagok nélkülözhetetlen szerepet töltenek be az építőiparban. Az emberiséggel egyidős az építési tevékenység, eleinte vályogtéglákat használtak és kötőanyagként bitument és meszet, de ezek víz alatt nem kötöttek meg és alakjukat nem tartották meg, vagyis az időjárásnak kitéve nem voltak hosszú életűek. Később, a portlandcement elődjét, a vulkáni hamut égetett mésszel összekeverve az ókori rómaiak alkalmazták, mint kötőanyagot. A hajózás elterjedésével egyre nagyobb hangsúlyt kapott egy olyan víz alatt is megkötő kötőanyag előállítása, mint a cement. A legismertebb és legnagyobb mennyiségben használt kötőanyag a portlandcement, melynek a 19. század körül alakult ki a mai napig használt változata, nevét az angliai Portland városáról kapta, ahol először alkalmazták. A népesség exponenciális növekedésével és a technológia fejlődésével egyre nagyobb lett az igény az építkezésre, így a cement nagymértékű gyártására is.

Kötőanyag definíció szerint minden olyan finomra őrölt szemcséjű por, amely víz hozzáadásával pépet képez, majd bizonyos időn belül meg is köt és végül eléri a szabvány által megkívánt szilárdságot, továbbá alkalmas a hozzáadott adalékanyagokat és építőelemeket összekötni. Csoportosításuk történhet ásványi eredetük, kötési mechanizmusuk és előállításuk szerint, utóbbin belül megkülönböztethetünk mesterségesen és természetesen előállított kötőanyagokat. Kötési mechanizmus alapján két csoportba oszthatók, fizikai úton (bitumen, enyv) és kémiai úton, reakciók által (cement, gipsz) megszilárduló kötőanyagok. Ásványi eredet szerint lehetnek a kötőanyagok szervesek, mint a bitumen, az enyvek és a gyanták. A másik szervetlenek csoportja, melyek különböző fémek oxidjaiból, hidroxidjaiból, szilikátjaiból vagy egyéb sóiból állnak, mint a gipsz és a cement.

A szervetlen kötőanyagokat az építőipar tovább osztályozza, és három csoportot adnak meg attól függően, hogy milyen körülmények között szilárdulnak meg. Az első csoportot nem hidraulikus kötőanyagoknak nevezzük, melyek víz alatt nem képesek megszilárdulni. Ebben az esetben a kötőanyagot a víz hozzáadása után levegőn hagyják kötni és szilárdulni. Ide sorolható az agyag, az égetett mész és a gipsz. A második csoportba a gyengén hidraulikus kötőanyagok tartoznak, melyek víz jelenlétében kötnek meg, de a kötési és szilárdulási folyamat nagyon lassan zajlik. Ebbe a kategóriába tartoznak például a hidraulitok, melyek

rejtett hidraulikus tulajdonságuknak köszönhetően aktiváló anyagok (pl. Ca(OH)_2 , oltott mész) jelenlétében képesek megszilárdulni, de önmagukban nem kötnek meg. Idetartozik a kohósalak, a pernye és a trassz. A harmadik csoport pedig a hidraulikus kötőanyagok, melyek levegőn és víz alatt is képesek megkötni és szilárdulni. Ebbe a csoportba tartozik a cement.

A cement egy szervetlen, mesterségesen előállított, zsugorított, kémiai reakciók által megkötő, hidraulikus kötőanyag. A cement összetételétől függően lehet szilikát vagy aluminát alapú. A legismertebb szilikát alapú cementfajta a portlandcement, mely főleg kalcium-szilikát ásványokat (alit, belit) tartalmaz. A kalcium-szilikát ásványok hidrátvegyületei biztosítják a megfelelő szilárdságot, időállóságot és tartósságot, amit kétezer éves római kori építmények bizonyítanak. Az aluminát- vagy bauxitcementek esetében a kalcium-aluminát ásványok hidratálódnak és megszilárdulva remek tűzállósággal bírnak. Normál körülmények között szerkezetek építéséhez nem használhatók fel mivel szilárdságukat elveszíthetik.

Az MSZ EN 197-1 szabvány [4] a normál felhasználású cementeket öt fő csoportba sorolja, amit az 1. táblázat mutat be. A cementek főalkotórészei: portlandcementklinker (K), granulált kohósalak (S), természetes puccolánok (P), természetes kalcinált puccolánok (Q), savas jellegű pernye (V), bázikus jellegű pernye (W), égetett pala (T), mészkő (L, LL), szilikapor (D).

Az 1. táblázatban is látható, hogy a portlandcementekben a legnagyobb mennyiségű összetevő a portlandcementklinker. A portlandcementklinker nem homogén anyag, különböző kristályos fázisokból áll, amiket üveges fázis köt össze. Kémiai összetételét tekintve különböző fém-oxidok építik fel (pl. SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3). A portlandcementklinker legnagyobb mennyiségben kalcium-szilikátokat tartalmaz. Két fő klinkerásványt tudunk kiemelni, amik többek között a cement mechanikai tulajdonságait is meghatározzák. Az egyik a trikálcium-szilikát ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), a portlandcementklinker legfontosabb és legnagyobb mennyiségben jelenlévő ásványa, ami a cement nagy kezdőszilárdságát adja és hozzájárul a végszilárdság kialakulásához. A $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ többnyire szennyezetten van jelen, amit alitnak neveznek. Az alitot a portlandcementklinker gyors hűtésével tudjuk csak szobahőmérsékleten stabilizálni. A másik fontos klinkerásvány, a dikalcium szilikát ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) β -módosulata másnéven belit amit ugyancsak a polimorf módosulatok közül gyors hűtéssel lehet stabilizálni. A belit az alitnál lassabban hidratálódik ezért a kezdőszilárdsága kisebb.

Másik főalkotórésze lehet a cementnek a granulált kohósalak (S), ami a vas-oxid olvasztásakor a vasgyártásban keletkező nagy SiO_2 tartalmú melléktermék. A cement kötése során képződő aktiváló anyag (Ca(OH)_2) jelenlétében hidraulikus tulajdonságú.

A puccolános anyagok (P, Q) természetes eredetűek, főleg reakcióképes szilícium-dioxidot és alumínium-oxidot tartalmaznak. Önmagukban vízzel keverve nem kötőképes anyagok. Finomra őrölve és víz jelenlétében oldott Ca(OH)_2 -dal reakcióba lépnek (hasonlóan a kohósalakhoz) és szilárd kalcium-szilikát- és kalcium-aluminát-hidrátokat képeznek. Lehetnek természetesek (P) vagy természetes kalcináltak (Q). A természetes kalcináltak hőkezeléssel aktivált vulkanikus eredetű anyagok, agyagok, palák vagy üledékes kőzetek.

A pernye (V, W) szénpor elégetésekor képződő porszerű anyag, a kazánok füstgázaiból elektrosztatikusan, vagy mechanikusan választják ki. A cementben csakis ilyen módszerrel nyert pernyét szabad alkalmazni. Megkülönböztethetünk savas (V), illetve bázikus (W) jellegű pernyéket. A savas jellegű pernye alapvetően reakcióképes SiO_2 -t és Al_2O_3 -at tartalmaz, míg a bázikus jellegű reakcióképes CaO -t is tartalmaz.

Az égetett pala (T) speciálisan égetett olajpala, amely klinkerásványokat javarészt dikalcium-szilikátot és monokalcium-aluminátot tartalmaz. Nagy mennyiségű puccolánosan aktív oxidokból (pl. SiO_2) áll. Ha finomra őröljük az égetett palát, akkor a portlandcementhez hasonló hidraulikus és puccolános tulajdonságokkal rendelkező anyagot kapunk.

A cementhez használt mészkőnek (L, LL) több követelménynek is meg kell felelnie. A kalcium-karbonát tartalom legkevesebb mennyisége 75 m/m%, az agyagtartalom maximális mennyisége 1,2 m/m%, és az összes szervesszén-tartalom pedig maximum 0,2 m/m% (LL) és 0,5 m/m% (L) lehet.

A szilikapor (D) a szilícium- valamint ferro-szilícium-ötvözetek gyártása során, a nagy tisztaságú kvarc szénnel való redukációjakor keletkező finom gömbalakú részecskékből áll. Az amorf SiO_2 tartalma minimum 85 m/m% kell, hogy legyen. Elemi Si-tartalma maximum 0,4 m/m% lehet.

1. táblázat Az általános felhasználású cementek fajtái és alkotórészei [2]

Fő cementfajták	A 27 termék jelölése (az általános felhasználású cementek fajtái)		Mennviségek m/m%-ban ^{a)}										
			Főalkotórészek										Melléalkotórészek
			Klin-ker	Gra-nulált kohó-salak	Szili-kapor	Puccolán		Pernye		Ége-tett pala	Mészkő		
						termé-szetes P	kalci-nált Q	sava-nyú V	bázi-kus W		T	L	
CEM I	Portland-cement		95–100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
CEM II	Kohósalak-portlandce-ment	A-S	80–94	6–20	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		B-S	65–79	21–35	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	Szilikapor-portlandce-ment	A-D	90–94	–	6–10	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	Puccolán-portlandce-ment	A-P	80–94	–	–	6–20	–	–	–	–	–	–	0–5
		B-P	65–79	–	–	21–35	–	–	–	–	–	–	0–5
		A-Q	80–94	–	–	–	6–20	–	–	–	–	–	0–5
		B-Q	65–79	–	–	–	21–35	–	–	–	–	–	0–5
CEM II	Pernye-portland-cement	A-V	80–94	–	–	–	–	6–20	–	–	–	–	0–5
		B-V	65–79	–	–	–	–	21–35	–	–	–	–	0–5
		A-W	80–94	–	–	–	–	–	6–20	–	–	–	0–5
		B-W	65–79	–	–	–	–	–	21–35	–	–	–	0–5
	Égetettpala-portlandce-ment	A-T	80–94	–	–	–	–	–	–	6–20	–	–	0–5
		B-T	65–79	–	–	–	–	–	–	21–35	–	–	0–5
	Mészkő-portlandcement	A-L	80–94	–	–	–	–	–	–	–	6–20	–	0–5
		B-L	65–79	–	–	–	–	–	–	–	21–35	–	0–5
		A-LL	80–94	–	–	–	–	–	–	–	–	6–20	0–5
		B-LL	65–79	–	–	–	–	–	–	–	–	21–35	0–5
	CEM III	Kompozit-portlandce-ment ^o	A-M	80–94	< -----6–20----- >								0–5
			B-M	65–79	< -----21–35----- >								0–5
Kohósa-lak-cement		A	35–64	36–65	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		B	20–34	66–80	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		C	5–19	81–95	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
CEM IV	Puccoláncement ^o	A	65–89	–	< -----11–35----- >					–	–	–	0–5
		B	45–64	–	< -----36–55----- >					–	–	–	0–5
CEM V	Kompozitce-ment ^o	A	40–64	18–30	–	< -----18–30----- >			–	–	–	–	0–5
		B	20–38	31–49	–	< -----31–49----- >			–	–	–	–	0–5

a A táblázat értékei a fő- és mellékalkotórészek összegét tartalmazzák.

b A szilikapor aránya legfeljebb 10% legyen.

c A CEM II/A-M és a CEM II/B-M összetett portlandcementek, a CEM IV/A és CEM IV/B puccoláncementek, valamint a CEM V/A és CEM V/B kompozitcementek esetében meg kell adni a jelölésben a klinker mellett található főalkotórészeket.

A mellékalkotórészek speciálisan kiválogatott, szervesetlen és természetes, a klinkergyártásból származó ásványi anyagok, de emellett lehetnek a már említett anyagok,

amennyiben nem fő alkotóanyagok. Lehetnek, inerte, gyengén vagy rejtetten hidraulikusak, esetleg puccolános tulajdonságúak, de mindenképp javítják a cement fizikai tulajdonságait, mint például a bedolgozhatóságot.

A gyártás során kalcium-szulfátot (gipszkövet, félhidrátot és anhidritet) adnak még a cement alkotóihoz, ami segít a cement kötésének szabályozásában. Ezen kívül a cementben, a gyártást és a cement tulajdonságait javító adalékok maximum 1 m/m%-ban lehetnek jelen.

2. táblázat A mechanikai és fizikai követelmények előírt jellemző értékei [2,4]

Szilárd- sági osztály	Nyomószilárdság MPa			Kötési idő kezdete	Térfogat-állandó- ság (tágulás)	
	Kezdőszilárdság		Szabványos szilárdság			
	2 napos	7 napos				
			28 napos		perc	mm
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 L ^a	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 L ^a	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-				

^a Ez a szilárdsági osztály csak a CEM III cementekre vonatkozóan előírás.

A már tárgyalt összetételű cementeknek több (pl. 2. táblázatban megadott fizikai) követelménynek kell megfelelniük, melyeket a MSZ EN 197-1 szabvány taglal. Az egyik legfontosabb a szabványos nyomószilárdság, amit 28 nap elteltével ér el a cement. A kezdőszilárdság a 2 vagy 7 napos nyomószilárdság, amely alapján három osztályba tudjuk sorolni a cementeket: N jellel a normál, R jellel a nagy kezdőszilárdságú és L jellel a kis kezdőszilárdságú cementet tudjuk megkülönböztetni. [5]

A szilárdságon kívül fontos paraméter a kötési idő, mivel elegendő idő kell a beton fel- és bedolgozásához. Ez nagyban függ a klinker tartalmától, összetételétől, az őrlés finomságától és a hőmérséklettől. Minél több klinkert, azon belül is alitot tartalmaz, annál gyorsabban köt meg. Gyorsítható még a kötés nagy őrlési finomsággal és a hőmérséklet növelésével.

A térfogat-állandóság szintén fontos fizikai követelmény (2. táblázat). A klinkerégetés során visszamaradhat el nem reagált szabad mész, amely a túlégetés következtében csak később reagál a vízzel, így késleltetett térfogatonövekedést okoz a szilárdulás során. A térfogatonövekedést 10 mm-ig engedi meg a szabvány.

2.2. Cement hidratációja [3,6]

A cementet vízzel összekeverve kezdetben pépszerű és jól formázható, majd a klinkerásványok reakciója után megköt, végül kőszerűen megszilárdul (a szilárdulási folyamat évtizedeken át is tarthat).

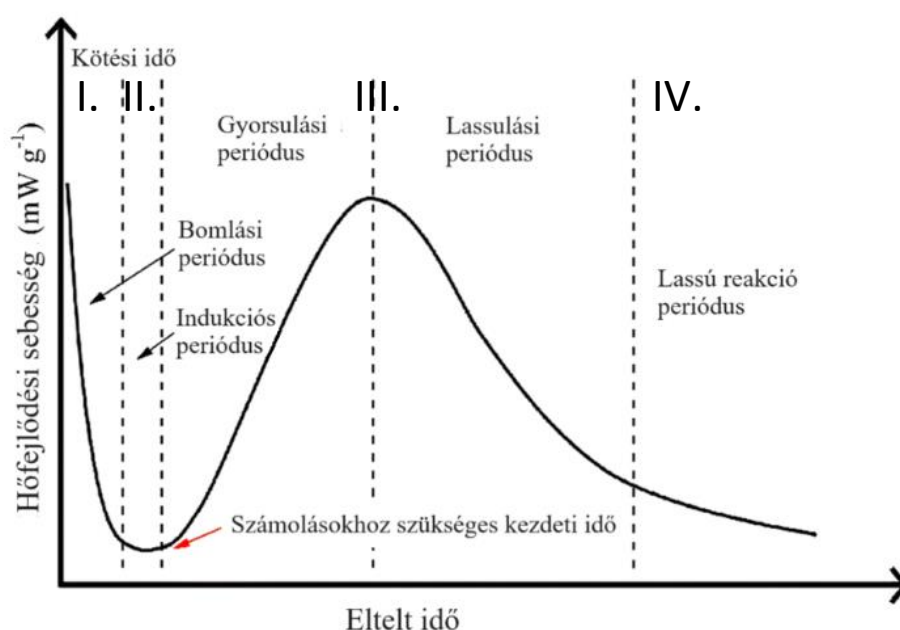
Minden klinkerásvány reagál a vízzel, csak eltérő sebességben. A szilikátos klinkerásványok (alit, belit) gondoskodnak ténylegesen a cement szilárdságáról, azonos módon hidratálódnak, csak az alit gyorsabban. Főtermékként közel amorf állapotú kalcium-szilikát-hidrát gél (CSH-gél) kapunk, melléktermékként pedig portlandit (Ca(OH)_2) alakul ki, ami nem vesz részt a szilárdság kialakításában.

Elsősorban a kalcium-szilikátok hidratációja okozza a cement hidraulikus megszilárdulását, de a szilárdulási folyamatban más kémiai vegyületek is részt vesznek, mint például a trikálcium-aluminát. A trikálcium-aluminát hidratációjánál először keletkező, jelentős szilárdságot adó, hidrat termékek nem stabilak és idővel átalakulnak egy stabilabb módosulattá, aminek viszont már kicsi a szilárdsága. A trikálcium-aluminát hidratációja szulfát-ionok jelenlétében (gipszkő adagolással) eltérő módon megy végbe. Ha sok gipszkövet adagolunk ettringitet ($6 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ SO}_3 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$), ha keveset monoszulfátot ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$) kapunk. Az ettringit képződése gyorsabban játszódik le, és ebből képződik a monoszulfát. A két vegyület képes egymásba kölcsönösen átalakulni, ami a trikálcium-aluminát és a szulfátionok arányától függ. A keletkezett monoszulfát külső szulfátion-forrás hatására ettringitté tud átalakulni, ami térfogat-növekedéssel jár (szulfátkorrózió).

A trikálcium-alumináthoz hasonlóan fontos a szulfátionok szerepe az aluminát-ferritek hidratációja során. Szulfátionok jelenléte nélkül itt is hidrogránát fázis alakul ki, de alumínium- és vas-hidroxid keletkezése mellett. Szulfátionok jelenlétében, a főtermék az ettringit vagy a monoszulfát, ahol az alumínium egy részét vas helyettesíti, és a melléktermék alumínium-hidroxid (Al(OH)_3). A kolloid állapotú Al(OH)_3 megakadályozza a szulfátkorróziót, így nem fog káros hatású duzzadás bekövetkezni a betonban.

A cement hidratációja, más kémiai reakciókhoz hasonlóan hőfejlődéssel jár (hidratációhő). Ezt befolyásolja az őrlés finomsága, azaz minél kisebb a cement szemcsemérete, annál nagyobb a fajlagos felülete, ami intenzívebb reakciót eredményez. A

cement összes hőfejlesztése határozza meg, hogy gyorsan vagy lassan szilárduló betonként alkalmazható. A hőfejlődés időben nem egyenletes, ezért négy nagyobb szakaszt tudunk kiemelni, ahogy az 1. ábra is mutatja. Az első szakasz rövid ideig tart (kb. 15 perc) és nagy hőfejlődéssel jár, ekkor megkezdődik az elsődleges ettringit képződés. A második szakasz kis hőfejlődésű és néhány óráig tart, amely alatt a friss beton még jól alakítható. A harmadik szakasz megint intenzívebb hőfejlődést mutat, mert megindul a kalcium-szilikát-hidrátok és portlandit képződése, illetve folytatódik az ettringit keletkezése. Végül, az utolsó szakaszban a hidratáció sebessége jelentősen lecsökken, de folytatódik és az erőteljes szilárdulás 28 napig tart. Ezt követi egy éveken át tartó utószilárdulási folyamat.

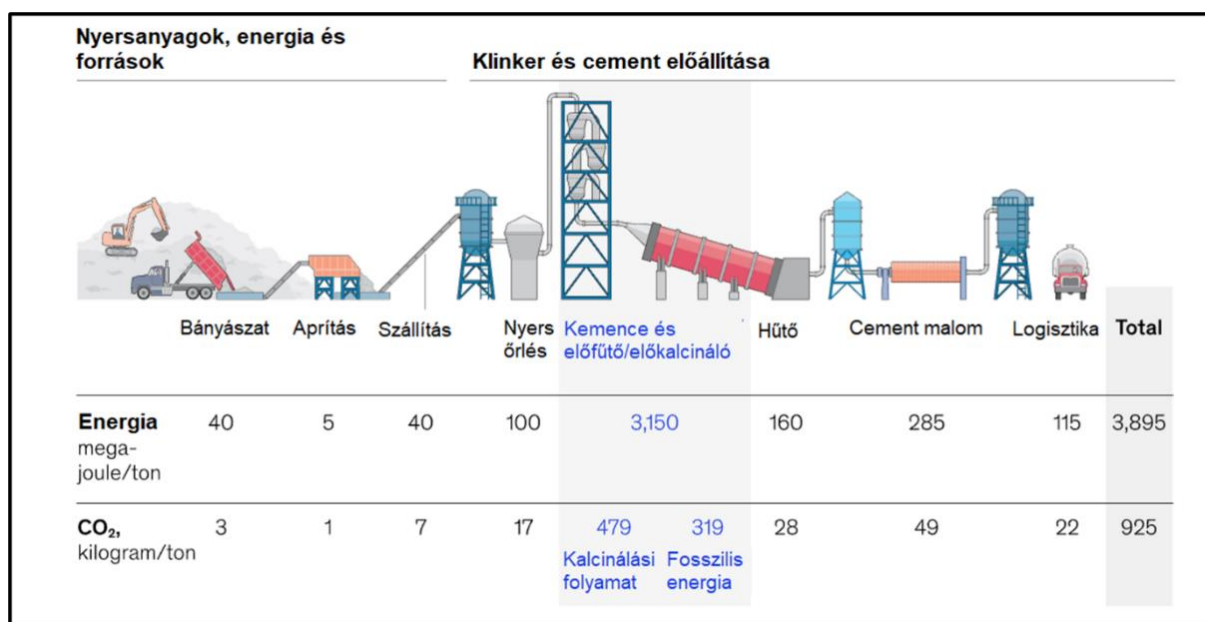


1. ábra A hidratációs hőfejlődés az eltelt idő függvényében [7]

2.3. Cement helyettesítő anyagok [2,8]

Ahogy már a bevezetésben is említettem, a portlandcement az egyik legnagyobb mennyiségben használt építkezési anyag, melynek gyártása jelentős CO_2 kibocsátással jár (2. ábra). A 2. ábra mutatja, hogy a legnagyobb CO_2 kibocsátással és energiaigénnyel járó gyártási folyamat, az maga a cementklinker előállítása. Ezt a környezetterhelő hatást, egyrészt a fosszilis energia kiváltásával, valamint a keletkező CO_2 megkötésével vagy tárolásával [9,10] tudjuk csökkenteni. A másik, sokkal hatékonyabb megoldás a cement kiegészítő és helyettesítő anyagok alkalmazása, melyekkel a mészkő kalcinálásánál keletkező CO_2

menyiségét közvetlenül csökkentjük. A cement helyettesítő anyagok használatával a CO₂ kibocsátás csökkentése mellett, a felhasznált energia mennyiségét is csökkenteni tudjuk. A helyettesítő anyagokkal esetleg jobb, vagy különleges mechanikai tulajdonságokat is el lehet érni.



2. ábra Cement előállításának folyamatábrája, azon belül energiabefektetése, illetve szén-dioxid kibocsátása [11]

A szakirodalom három nagyobb csoportra bontja a kiegészítőanyagokat: inert, hidraulikus és puccolános anyagok. Az inert anyagok nem lépnek kölcsönhatásba a cementtel, javarészt, mint töltőanyag (pl. mészköliszt, kvarcliszt) alkalmazzák, de idesorolhatóak a pigmentek (pl. fém-oxidok) is. Legnagyobb mennyiségben a mészkölisztet alkalmazzák, mint töltőanyagot, adagolásával kedvezőbb bedolgozhatósághoz, nagyobb területhez és vízzárósághoz juthatunk. Viszont fontos azt is megjegyezni, hogy szulfáttartalmú talajvízzel érintkezve taumazit-szulfátkorrózió alakulhat ki, mely növeli a duzzadás és ezáltal a repedezés kockázatát. Az előzőhöz hasonlóan alkalmazható a kvarcliszt, de nehezebb őrölhetősége miatt kisebb mennyiségben alkalmazzák. A pigmentek többnyire olyan fém-oxidok lehetnek, melyek a cementtel nem lépnek kémiai reakcióba és lúgállóak, szemcseméretük a cementével azonos tartományba esik. A legfontosabb pigmentek a vas-oxid (barnás, vörös árnyalatok), a króm-oxid (zöldes árnyalatok), a korom (fekete) és a titán-dioxid (fehér).

A hidraulikus anyagok víz jelenlétében kötnek és szilárdulnak meg, ezek közé tartozik a kohósalak és a pernye. Mindkét anyag mesterséges hidraulit, ipari melléktermék és hulladékanyag, melyek reakcióképes kovasavat tartalmaznak. Alkalmazásukkal csökken a környezetszennyezés, és pozitívan befolyásolják a cementek tulajdonságait. A kohósalak összetétele nagyon hasonlít a portlandcementklinkeréhez, de arányaikban mégis eltérnek a komponensek. Nyersanyagként is felhasználható a klinker előállításakor, ekkor maga a kalcinálási folyamat nem olyan energiaigényes, hiszen már eleve CaO formában található meg benne a kalcium. Helyettesítő anyagként alkalmazható a klinker további komponenseivel együtt őrölve, vagy külön-külön őrölve és később összeöntve. A keletkező hidráttermék tömörebb szerkezetet ad, mint tisztán a portlandcement, de maga a hidratáció is lassabban megy végbe, viszont csökkenti a hidratációs hőt, a deformációs hajlamot és javítja a korrózióállóságot és nem befolyásolja a fagyállóságot.

A pernye szemcsemérete általában finomabb, mint a cementé, amivel magát a pernyét alkalmazzák. Emellett a gömb alakúvá szilárdult részecskék nagy vízigény mellett tovább javítják a bedolgozhatóságot, de magas kén-tartalma miatt ügyelni kell a korrózióvesztésre. A pernye emellett csökkenti a cement hidratációs hőjét, repedezésre való hajlamát és javítja a fagyállóságát. Szemcsemérettel összefüggésben változhat a puccolános aktivitása, minél finomabb a frakció annál reaktívabbak a pernyében található metastabil szilikátok, ezért a puccolános helyettesítő anyagok közé is szokás sorolni.

A puccolános anyagok aktív komponense (pl. aktív szilika) víz jelenlétében reagál a cement hidratációjakor létrejövő kalcium-hidroxiddal, ami így CSH-gélt alakít ki, ez nagyon hasonló a cement hidratációjakor keletkező CSH-gélhez. Ezért elmondható, hogy ezen kiegészítőanyagok alkalmazása hozzájárulhat a későbbiekben további szilárdság növekedéshez. A puccolános anyagokat létrejöttük szerint tudjuk csoportosítani. Természetes puccolánok közé tartozik a trassz, a kovaföld, míg a mesterséges puccolánok közé a pernye, a szilikapor és a metakaolin.

A trassz őrölt, savanyú, üveges vulkáni tufa, amit már az ókori rómaiak is használtak. Az üveges fázis mennyisége 50-60 m/m% körül kedvező és az MSZ 4706-2 szabvány [12] szerint a reakcióképes szilícium-dioxid tartalma minimum 25 m/m% kell hogy legyen.

A szilikapor az általánosan használt puccolános kiegészítőanyagok közül az egyik legnagyobb reaktivitással rendelkezik. Cement kiegészítőanyagként csak folyósítószerrel együtt alkalmazható, mivel a kis szemcseméret miatt könnyen aggregálódhat, és nehezítheti a bedolgozhatóságot. Adagolása ellenállóbbá teszi a betont savakkal és lúgokkal szemben, valamint finomsága révén csökkenti a lehetségesen létrejövő pórusok mennyiségét és méretét, ezáltal növeli a szilárdságát is.

2.4. Az üveg

Az üveg olyan anyag, amelyben nincs meghatározott szabálya az építőelemek periodikusságának (amorf). A keletkezés szerint megkülönböztethetünk természetes és mesterséges üvegeket. A szilikátüveg fémek és félfémek oxidjaiból épül fel minden esetben, ezeknek az oxidoknak az aránya és mennyisége határozza meg a mechanikai, kémiai és fizikai tulajdonságait. Az oxidokat az üveg szerkezetére gyakorolt hatásuk szerint lehet csoportosítani rácsképző, olvasztó, átmeneti és módosító oxidokra. [13]

A rácsképző oxidok közül kiemelhetjük a SiO_2 -t, mely a szilikátüvegek legfontosabb alkotórésze (50-80%). Másik fontos rácsképző oxid a B_2O_3 , amit nagyobb mennyiségben (6-22%) a boroszilikát üvegekben alkalmaznak. Ez az oxid olvasztást könnyítő hatású és növeli a kémiai ellenállóképességet. Speciális (pl. ultraibolya sugárzást átbocsájtó) üvegek előállításakor rácsképzőként alkalmaznak még P_2O_5 -t. Az olvasztó oxidok (alkáli-oxidok) segítik az olvadék képződését kisebb hőmérsékleten. Az átmeneti oxidok (pl. Al_2O_3) növelhetik a kémiai ellenállóképességet, hálózatképző és hálózatmódosító szerepet is betölthetnek. Emellett az üveg felhasználásától függően alkáliföldfém-oxidokat (pl. CaO) is tartalmazhat, melyek befolyásolják az olvadék viszkozitását, növeli az üveg kémiai ellenállóképességét és keménységét. [14]

A gyártási folyamat a megfelelő szárított és őrölt alapanyagok keverékének összeállításával kezdődik, majd ezt homogenizálják és ezt követően az olvasztókemencékbe kerül a keverék, ahol homogén olvadék alakul ki. Az olvadékot hűtik a különböző formázási módszereknek megfelelően, formázzák és az olvadék teljes dermedésével a tárgy eléri végleges alakját. [15]

Különböző kutatók [16,17] vizsgálták az üveghulladék cement helyettesítő anyagként történő alkalmazhatóságát. Megállapították, hogy az üvegben található nagy alkáli-tartalom

problémát jelenthet, mivel ártalmas alkáli-szilika reakciót válthat ki, melynek terméke az alkáli-szilika gél, ami a beton repedezéséhez és tönkremeneteléhez vezet. Kimutatták, hogy eléggé finom szemcseméretűre őrölt üveg esetében az alkáli-szilika reakció okozta duzzadás nagy mértékben lecsökken.

Idir és társai [18] különböző színű kevert üveghulladék puccolános tulajdonságát vizsgálták széles szemcseméret-tartományban a cement 10-40 m/m%-os helyettesítésénél. Az üveget 5 nagyobb csoportba osztották szemcseméret szerint: 1250-2500 μm , 630-1250 μm , 160-315 μm , 80 μm -nél kisebb, illetve 41 μm -nél kisebb. Megállapították, hogy a szilárdságot és a puccolános aktivitást nagymértékben befolyásolta az üvegtartalmon kívül az üveg finomsága. Minél finomabb volt az üveg annál nagyobb szilárdsági értékeket értek el. A 80 μm -nél kisebb (200 m^2/kg finomságú), illetve 41 μm -nél kisebb (540 m^2/kg finomságú) finom üvegpороk kedvező puccolános aktivitást mutattak 10 és 20 m/m%-os helyettesítésénél, de a helyettesítés mértékét növelve ez a hatás visszaesett. A dolgozatomban ezért kellően finom (466 m^2/kg finomságú) üvegport használok.

Halbinak és társai [19] azt kutatták, alkalmazható-e az üveghulladék helyettesítő anyagként úgy, hogy azt a cementklinkerrel együtt őrlik. Megállapították, hogy a referencia portlandcementhez képest javultak bizonyos mechanikai tulajdonságok. Kezdetben sokkal gyorsabb szilárdság növekedést mutattak az üveghulladékkal őrölt cementklinkerrel készült próbatest, később a 28 napos korban nagyobb szilárdsági értékeik voltak, mint a referencia mintáknak. A kötési idő kezdetét az üveg adagolása nem befolyásolta.

Aliabdo és társai [20] hulladéküveget cement kiegészítőanyagként alkalmaztak és vizsgálták 0, 5, 10, 15, 20 és 25 m/m% adagolásnál a helyettesítés hatását a beton fizikai és mechanikai tulajdonságaira. Az üveggel való helyettesítés 15 m/m%-ig javította a beton tulajdonságait.

2.5 Az agyagtégla

Európában a kerámiaipar különböző gyártási szakaszaiban keletkező hulladék mennyisége globálisan 3-7%-ot tesz ki, ami évente több millió tonna kalcinált agyagot jelent, amelyet egyszerűen a hulladék lerakókba kerül. Bár a kerámiahulladékok újrahasznosításával már foglalkoztak, de napjainkban az így újrahasznosított hulladékok mennyisége még mindig

elhanyagolható. A kerámiahulladék cement helyettesítő anyagként való újrahasznosítása nagy energiamegtakarítást jelenthet és jelentős környezeti előnyökkel járhat. [21]

A téglagyártás elvárása az alapanyagait tekintve nem olyan szigorú, mint például a finomkerámiai gyártásé, de fontos az egyes szennyező anyagok (mészkő kavics, gipsz) kiszűrése a későbbi termék hibák elkerülése érdekében. A téglát nagy szilárdságú, viszont a jó hőszigetelés elérése érdekében pórusos, amiket éghető pl. szerves hulladékok adagolásával alakítanak ki. Ilyen szerves hulladék lehet például a fűrészpor. A téglát fő nyersanyaga a téglagyag, mely színesre éghető, viszonylag kis hőmérsékleten lágyul. A téglagyag agyagásványokon (kb. 35%) kívül tartalmaz sok más komponenst (pl. kvarc, kalcit). Az általános gyártási eljárás, hogy a téglagyagot aprítás, nedvesítés, homogenizálás és formázás után szárítják és kiégetik. [22]

Navrátilová és Rovnaníková [23] a téglapor puccolános viselkedését elemezték. Megállapították, hogy a téglapor puccolános aktivitása nagymértékben függ az amorf fázisának mennyiségétől, a szemcseméret-eloszlástól és fajlagos felülettől. Ha a fajlagos felület nagy, vagyis a szemcseméret kicsi, akkor a puccolános reaktivitás nagyobb volt.

Wong és társai [24] építkezésből származó téglahulladék cement helyettesítő anyagként történő hasznosíthatóságát foglalták össze. A téglahulladékot leginkább, finom por formájában, cement kiegészítőanyagként érdemes újrahasznosítani. Általánosan elmondható, hogy 20 m/m%-ig helyettesítve a téglaporról a cementet, javulnak a beton mechanikai tulajdonságai. Azonban nagyobb helyettesítésnél már romlanak a szilárdsági értékek.

Aliabdo és társai [25] kimutatták, hogy a téglaport tartalmazó cementpépben csökkent a kialakuló pórusok száma és térfogata a puccolános reakció miatt. Ugyanakkor a téglapor mennyiségének növelése csökkentette a 28 napos nyomószilárdságot.

Ouyang és társai [26] vizsgálták a téglapor adagolásának hatását a cement hidratációs folyamatára, amit kvarcporral hasonlítottak össze. A téglapor hasonló felületi tulajdonságokkal rendelkezett, mint a kvarcpor. A hidratációs termékek és a téglapor között gyenge kötések alakultak ki, ami a hidratáció előrehaladtával nem változott. A cementpép és a téglapor között nem zajlott le kémiai folyamat. A téglapor a kvarcporhoz hasonlóan töltőanyagként viselkedtek.

3. Kísérleti rész

A dolgozatomban por állagú téгла- és üveghulladék alkalmazását vizsgáltam, mint cement helyettesítő adalékot. Vizsgálataim célja, hogy a kötőanyagként felhasznált cement mennyiségét csökkenteni lehessen a téгла- és üveghulladék porok hasznosításával helyettesítő anyagként. A különböző mennyiségű hulladékot tartalmazó kötőanyag jellemzéséhez kötőanyagpépet és habarcsot készítettem. Az MSZ EN 196-3 szabványnak [27] megfelelően készített kötőanyagpépet a kötőanyag vízigényének és a megszilárdult kötőanyagpép fázisösszetételének meghatározásához használtam. Az MSZ EN 196-1 [28] szabvány szerint készítettem el a habarcs mintákat, amelyeket a terület (bedolgozhatóság) és a kötőanyag szilárdságának jellemzésénél használtam.

3.1. Kísérlethez használt anyagok

3.1.1. Cement és homok

A vizsgálatok elvégzéséhez a Cemix Hungary Kft.-től származó, a Duna-Dráva Cement Kft. Beremendi Gyárában előállított, az MSZ EN 197-1 szabványnak [4] megfelelő, CEM I. 42,5 N portlandcementet használtam. A habarcs elkészítéséhez használt szabványos kavicsos homokot a Cemix Hungary Kft. szolgáltatta, aminek a szemcseméret-eloszlását a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat Szabványhomok szemcseméret eloszlása

Négyzetes lyukméret (mm)	Halmozott szitamaradék
2,00	0
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±1

A cement oxidos összetételét a 4. táblázat foglalja össze, mechanikai tulajdonságai pedig az 5. táblázatban találhatók. A cement vizsgálatait a cég által megbízott Cemkut Kft. végezte.

4. táblázat *A cement kémiai összetétele*

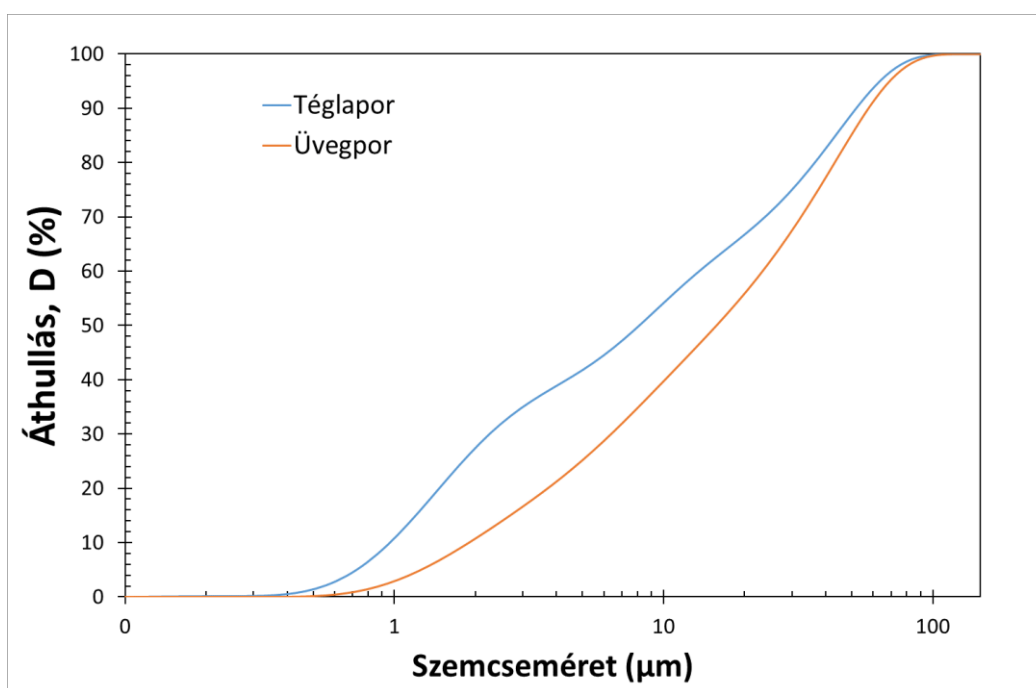
Komponens	Mennyiség (m/m%)
Izzítási veszteség	2,75
SiO ₂	20,54
Al ₂ O ₃	5,40
Fe ₂ O ₃	3,26
TiO ₂	0,27
CaO	61,97
MgO	1,61
K ₂ O	0,52
Na ₂ O	0,11
SO ₃	3,16
Oldhatatlan maradék	0,10
Cl ⁻	0,01
Szabad CaO	0,88

5. táblázat *A cement mechanikai jellemzői*

Tulajdonság	Vizsgálati eredmény
28 napos hajlítószilárdság (MPa)	8,7
28 napos nyomószilárdság (MPa)	54,2
Sűrűség (g/cm ³)	3,18
Fajlagos felület (cm ² /g)	3720
Víz a szabványos folyóssághoz (m/m%)	27,0

3.1.2. Kísérlethez használt üveg- és téglahulladék

A névlegesen 75 μm -nél kisebb szemcseméretű üveghulladékport a Daniella Ipari Park Kft. egy saját fejlesztésű HGPR malommal állította elő. A téglahulladék a Leier Hungária Kft.-nél a téglák méretre vágása- és csiszolásakor keletkezett, amelynek előőrlését egy Fritsch Pulverisette 13 Classic line tárcsás malommal végeztem el $\sim 100 \mu\text{m}$ -es tárcsatávolsággal. A hulladék üveg- és téglapor kémiai összetételét a 6. táblázat tartalmazza, melyet a SZIKKTI Labor Kft. vizsgált meg Philips Axios PW 4400/24 típusú hullámhosszdiszperzív röntgenfluoreszcens spektrométerrel, olvasztásos mintaelőkészítés alkalmazásával. Az üveg- és téglahulladék por fajlagos felület és sűrűség mérését a SZIKKTI Labor Kft. végezte el. A fajlagos felületet Blaine-féle készülékkel, a sűrűséget Anton Paar Ultrapyc gázpiknométerrel határozták meg az MSZ EN 196-6 szabványnak [29] megfelelően. Az üveghulladék por Blaine száma $4660 \text{ cm}^2/\text{g}$ ($466 \text{ m}^2/\text{kg}$ finomság), a téglahulladék por $9930 \text{ cm}^2/\text{g}$ ($993 \text{ m}^2/\text{kg}$ finomság) volt. Az üveghulladék por $2,56 \text{ g}/\text{cm}^3$, míg a téglahulladék por $2,90 \text{ g}/\text{cm}^3$ sűrűséggel rendelkezett. Az üveghulladék por finomsága az Idir és társai [18] által vizsgált $200 \text{ m}^2/\text{kg}$ és $540 \text{ m}^2/\text{kg}$ finomság közé esik, ami a puccolános aktivitásnál kedvezőnek bizonyult.



3. ábra Üveg- és téglahulladék por áthullási görbéi

6. táblázat Az üveg- és téglahulladék kémiai összetétele

Komponens	Mennyiség (m/m%)	
	Üveghulladék	Tégla-hulladék
Izzítási veszteség	-	0,74
SiO ₂	70,15	53,35
Al ₂ O ₃	1,77	16,48
Fe ₂ O ₃	0,45	6,20
TiO ₂	0,07	0,67
CaO	10,60	12,83
MgO	2,82	5,46
K ₂ O	0,56	2,95
Na ₂ O	13,42	0,68
SO ₃	0,04	0,28
Mn ₂ O ₃	0,01	0,16
P ₂ O ₅	0,02	0,12
SrO	0,06	0,05
ZnO	0,02	-

Az üveg- és téglahulladék por szemcseméret-eloszlását Fritsch Analysette 22 NeXT Nano típusú lézeres szemcseméret analízátorral mértem, ennek eredményét a 3. ábra mutatja. Az üveghulladék por áthullási görbéjén látható, hogy 75 µm-nél nagyobb szemcsék is vannak az örleményben. Ugyanakkor, az üveghulladék por 95%-ban 72 µm-nél kisebb szemcseméretű és a maximális szemcsemérete 118 µm. A mért szemcseméretek számtani középértéke 25 µm. A téglahulladék por az áthullási görbéje alapján kis mennyiségű (~0,2%) 100 µm-nél nagyobb

szemcsét is tartalmazott. Ugyanakkor, a minta 95%-ban 67 μm -nél kisebb szemcseméretű és a maximális szemcseméret 108 μm . A mért szemcseméretetek számtani középértéke 19 μm .

Amennyiben a hulladék porok kémiai és fizikai tulajdonságait a mesterséges puccolánokra vonatkozó szabvány (ASTM C 618) [30] szerint megvizsgáljuk, látható, hogy megfelelnek a következő feltételeknek: a SiO_2 , Al_2O_3 és Fe_2O_3 tartalmuk összesen több mint 70%, az SO_3 tartalmuk kisebb 3%-nál és izzítási veszteségük kisebb 10%-nál.

3.2. A téгла- és üvegpor alkalmazása cement helyettesítő anyagként

A CEM I. 42,5 N portlandcementhez 5, 10, 15, 20 és 25 m/m% téгла- és üvegport (helyettesítő anyagot) kevertem, és az így készített kötőanyag tulajdonságait vizsgáltam. Referenciaként a tiszta portlandcementet használtam. Először, a helyettesítő anyagok vízigényre és a megszilárdult 28 napos kötőanyagpép fázisösszetételére gyakorolt hatását vizsgáltam. Ezt követően a téгла- és üvegport tartalmazó kötőanyagok szilárdságát vizsgáltam az MSZ EN 196-1 [28] szabvány szerint készített habarcs próbatestekkel. 28 napos korban mértem a hajlító- és nyomószilárdságot. Referenciaként itt is a portlandcementet vettem alapul.

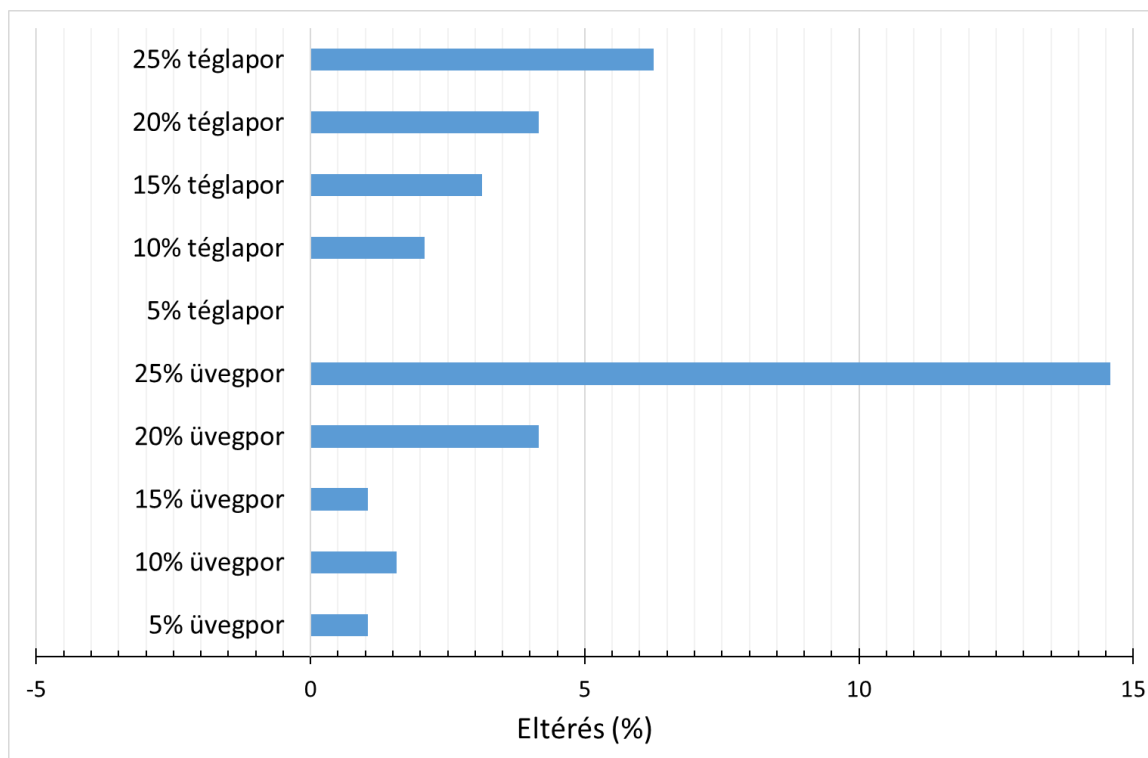
3.2.1. Vízigény meghatározása

A vízigény meghatározásához kötőanyagpépet készítettem 350 g kötőanyag (cement és helyettesítő anyag) és bizonyos mennyiségű víz keverékéből, amit egy Controls AUTOMIX típusú elektromos, programozható bolygó lapátos keverőgéppel kevertem össze az MSZ EN 196-3 szabványnak [27] megfelelően. A pépet ezt követően egy előre kiolajozott kúpos gyűrűbe töltöttem és párszor az asztalhoz ejtve tömörítettem, a felesleget egy kés segítségével lehúztam. A gyűrűt egy kézi Vicat-féle készülék alá helyeztem. Meggyőződtem arról, hogy a mérőrúd szabadon mozog. A rudat óvatosan a pép felületéig engedtem és rögzítettem, majd a rögzítőcsavar kioldásával a rúd szabadeséssel a cement pépbe süllyedt. Ezt követően leolvastam a rúd belesüllyedés mélységét. Akkor mondhatjuk, hogy a cementpép (kötőanyagpép) szabványos folyósságú, ha a mérőrúd és az üveglap közötti távolság 6 ± 2 mm. A vízigény, ennek a folyósságnak az eléréséhez szükséges vízmennyiség. Amennyiben a pép nem a szabványos folyósság határain belül volt, a víz adagot ehhez mérten növeltem vagy csökkentettem, majd kikevertem egy új pépet és a mérést megismételtem. A mért adatokat a 8. táblázatban adtam meg.

8. táblázat A kötőanyagpépek vízigénye

Minta		Vízigény [g]	Víz/cement tényező
Referencia		96,0	0,27
Üveg	5%	97,0	0,28
	10%	97,5	0,28
	15%	97,0	0,28
	20%	100,0	0,29
	25%	110,0	0,31
Tégla	5%	96,0	0,27
	10%	98,0	0,28
	15%	99,0	0,28
	20%	100,0	0,29
	25%	102,0	0,29

Az 4. ábrán látható a referenciához (portlandcementhez) viszonyított eltérés. Itt jól megfigyelhető, hogy a helyettesítés növekedésével egyre inkább nőtt a kötőanyagpép vízigénye. Az üvegpóráz 25 m/m%-os helyettesítésénél kaptam a legnagyobb értéket, míg 5% téglapor adagolása nem változtatta meg a kötőanyagpép vízigényét. A víz/cement tényező és a nyomószilárdság szoros kapcsolata régóta ismert [30], azaz a víz mennyisége és a 28 napos szilárdság között fordított arányosság van, a jobb teljesítőképességű és tartósabb beton eléréséhez kisebb víz/cement tényező szükséges. Érdemes kiemelni, hogy 20 m/m%-os helyettesítésig 5%-nál kisebb a vízigény növekedése. Ha az amerikai puccolánokra vonatkozó ASTM C 618-as szabványt [30] vesszük alapul, az ottani 15%-os vízigény növekedési határon belül marad, így ennek a feltételnek megfelelnek a használt anyagok.

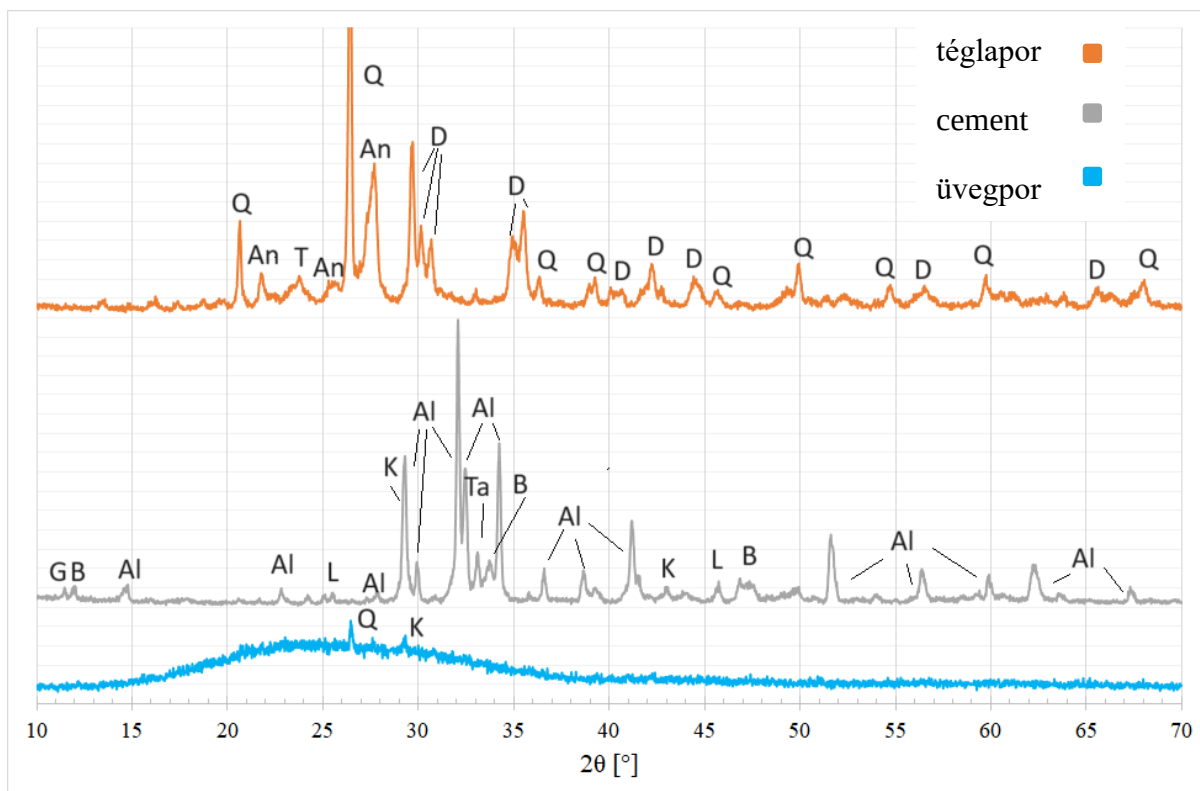


4. ábra A kötőanyagpépek vízigényének százalékos eltérése a referenciától

3.2.2. A megszilárdult kötőanyagpép fázisösszetételének vizsgálata

A fázisösszetételt egy Philips PW3710 típusú röntgendiffraktométerrel, Cu K α sugárzással, 50 kV feszültséggel és 40 mA áramerősséggel, 0,02 °/s sebességgel vizsgáltam. Az adatokat a mérés során az X'Pert Data Collector programmal gyűjtöttem, a diffraktogramok értékelését a HighScore Plus programmal és az ICDD PDF-2 2021 referencia adatbázissal végeztem.

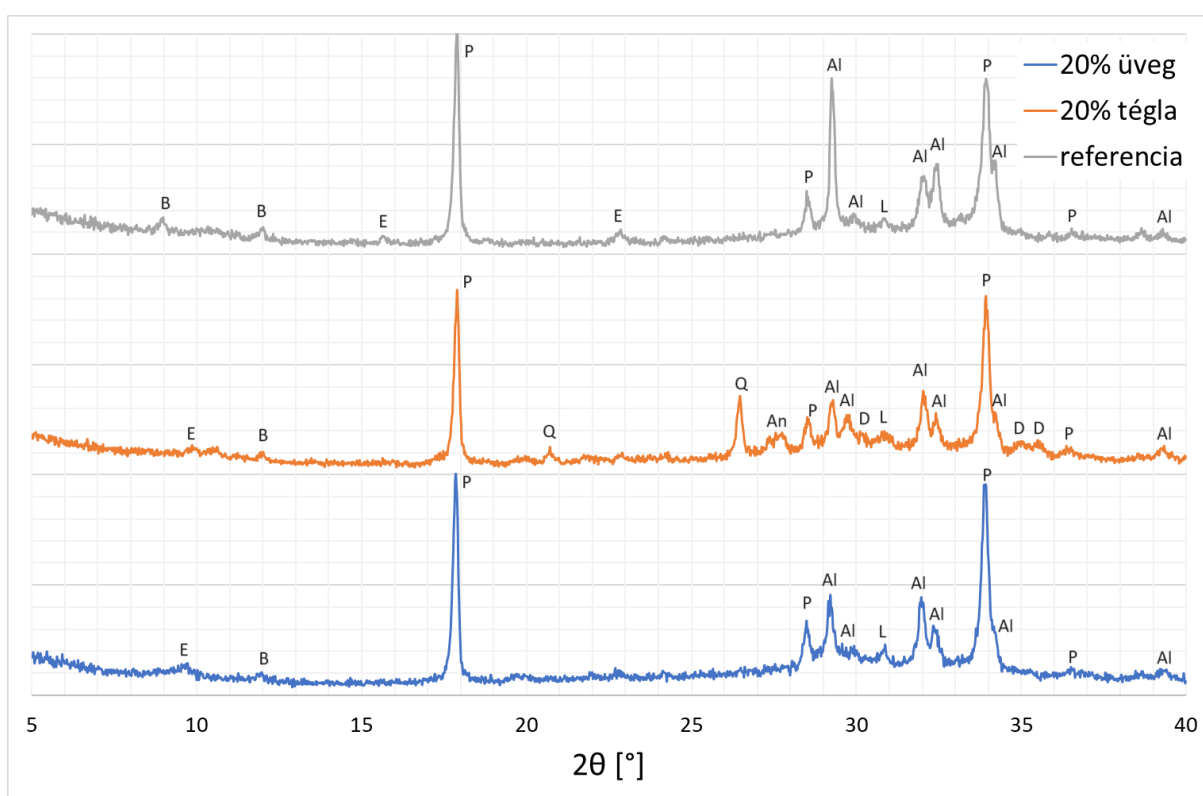
A 5. ábrán a kiindulási anyagok röntgendiffrakciós felvételeit láthatjuk, az üvegpor felvételén 10-40° 2 θ szögtartományban egy erőteljes széles csúcs látható, ami a nagy mennyiségű üveges fázis jelenlétét mutatja. Kis intenzitású kvarc és kalcit csúcsok jelzik a szennyezők jelenlétét. A téglaapor esetében a felvétel alapján már kisebb (44%) az amorf fázis mennyisége, és található még benne nagyobb mennyiségű, 22% diopszid, 16% anortit és 14% kvarc. A CEM I. portlandcement elsősorban kristályos fázisokat, nagy mennyiségű, 51% alitot (hatrurit), 7% belitet (larnit), és 10% brownmilleritet tartalmaz.



5. ábra A kiindulási téglapor-, cement- és üvegpapor röntgendiffrakciós felvételei (Q – kvarc PDF033-1161; An – anortit PDF01-085-0878; T – tridimit PDF042-1401; D – diopszid PDF01-077-5195; G – gipsz PDF033-0311; B – brownmillerit PDF030-0226; Al – alit PDF055-0740; K – kalcit PDF005-0586; Ta – trikalcium-aluminát PDF038-1429; L – larnit PDF033-0302)

Az üveg- és téglapor adagolásának a megszilárdult kötőanyagpép fázisösszetételére gyakorolt hatásának vizsgálatához próbatesteket készítettem. Itt a bemért cement és a helyettesítő anyag tömege összesen 300 g volt, mindegyik péphez egységesen 90 g vizet adtam hozzá és bolygó lapátos keverővel kevertem. A kötőanyagpépet 1-1 db 28 mm magas és 30 mm átmérőjű henger alakú műanyag formába töltöttem, tömörítettem majd 24 óra leteltével kiszedtem őket a formából. A próbatesteket vízzel teli ládába tettem a 28 nap leteltéig. Ezt követően 3 napon keresztül szárítószekrényben 50 °C-on szárítottam őket. Szárítást követően a mintát először kalapáccsal, majd Fritsch Pulverisette 0 típusú rezgő malom segítségével porítottam és a porrá őrölt minta fázisösszetételét röntgendiffrakcióval vizsgáltam. Ezután a mennyiségi analízis elvégzéséhez a por mintákat 10 m/m% ZnO-al hígítottam és Rietveld-féle teljes profil-illesztéssel meghatároztam a fázisok mennyiségét.

A 6. ábra a 20 m/m% üveg- illetve téglapor helyettesítéssel készült próbatestek diffraktogramját mutatja. Látható, hogy a felvételeken megjelent a cement hidratációja során keletkező portlandit és ettringit, emellett mindkét esetben láthatók még a kis intenzitású alit, belit és brownmillerit csúcsok. Mindkét felvételen látszik a CSH-gélre jellemző széles csúcs 25-40° 2 θ között. A téglaport tartalmazó mintákban a kvarc, anortit és diopszid fázisok reflexiói is megjelennek. A mennyiségi elemzés alapján kapott adatokból elmondható, hogy a referencia cementnél a portlandit mennyisége 14% volt, a helyettesítő anyagok 28 napos korban nem csökkentették számottevő mértékben a portlandit mennyiségét (pl. a 20 m/m%-os helyettesítés esetében a portlandit tartalom 13% volt).

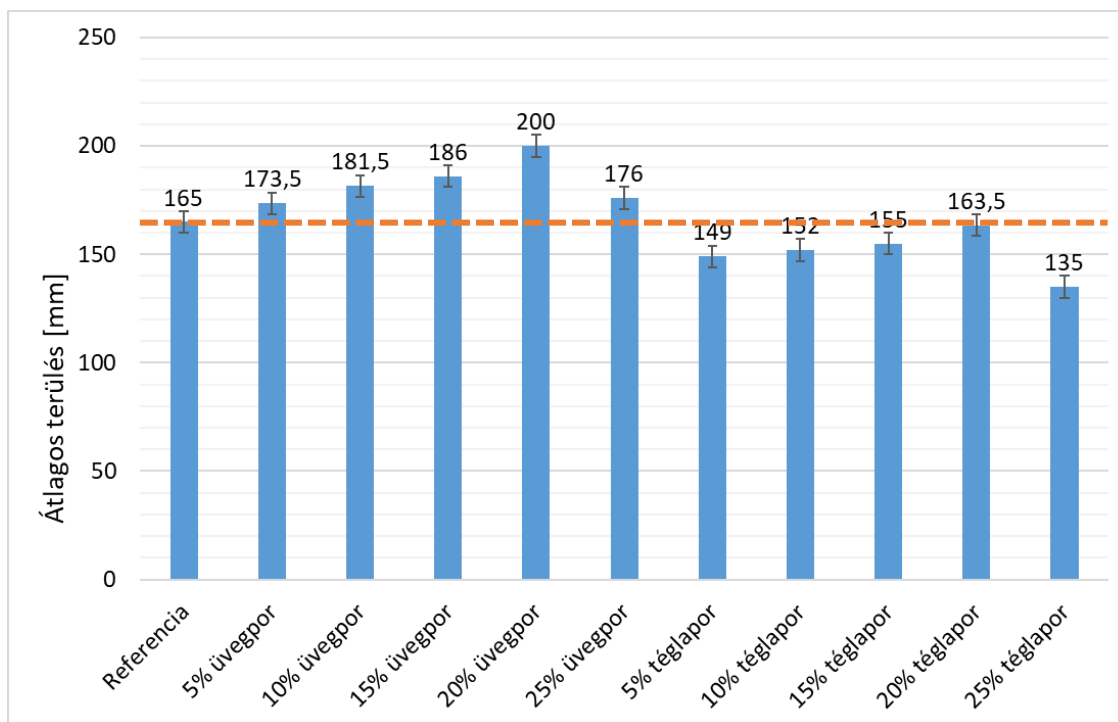


6. ábra A referencia és a 20 m/m%-os helyettesítéssel készült 28 napos kötőanyagpép minták röntgendiffrakciós felvételei (Q – kvarc PDF033-1161; An – anortit PDF01-085-0878; D – diopszid PDF01-077-5195; B – brownmillerit PDF030-0226; L – larnit PDF033-0302; P – portlandit PDF004-0733; E – ettringit PDF041-1451; Al – alit PDF055-0740)

3.2.3. Bedolgozhatóság vizsgálata

A CEM I. 42,5 N típusú cementet különböző tömegszázalékban (5, 10, 15, 20 és 25 m/m%) helyettesítettem üveg- és téglaporról. Az MSZ EN 196-1 szabvány [28] szerint

habarcsot készítettem, ami 450 g kötőanyagot (melyből rendre 22,5 g, 45 g, 67,5 g, 90 g és 112,5 g a cement helyettesítő anyag volt), 1350 g homokot aggregátumként és 225 ml vizet tartalmazott. A habarcsot egy Controls AUTOMIX típusú elektromos, programozható bolygó lapátos keverőgéppel kevertem. A keverés után a habarcs területét (bedolgozhatóságát) ejtőasztalon vizsgáltam. A bedolgozhatóságot a habarcs összetétele határozza meg. Befolyásolja a víz/cement tényező, a komponensek anyagi minősége és mennyisége. Ennek a tulajdonságnak a mérésére a habarcs területét vizsgáltam az MSZ EN 1015-3 szabvány [32] alapján ejtőasztallal. Az összekevert habarcsot két részletben az ejtőasztalra helyezett csonka kúp alakú formába töltöttem, amelynek mindkét részletét kanál segítségével tömörítettem. Ezután a formát levéve 15 s alatt 15 ejtést végeztem és lemértem a szétterült habarcs egymásra merőleges átmérőit. A két érték átlagolásával mm-ben meghatároztam a területet (7. ábra). A mérés átlagos szórása $\pm 1,5$ mm volt.



7. ábra A kötőanyag habarcsok területi értékei és eltérése a referenciától

A 7. ábrán látható, hogy a referencia cement területéhez képest a hulladék üvegpor tartalmazó habarcsnak növekedett a területe, míg a téglaport tartalmazó habarcsok esetében csökkent a terület. Tehát, az üvegpor javította és a téglapor rontotta a bedolgozhatóságot. Érdeemes megjegyezni, hogy a 20 m/m%-os téglaporos helyettesítéssel készült habarcs közelíti meg leginkább a referencia habarcs területét.

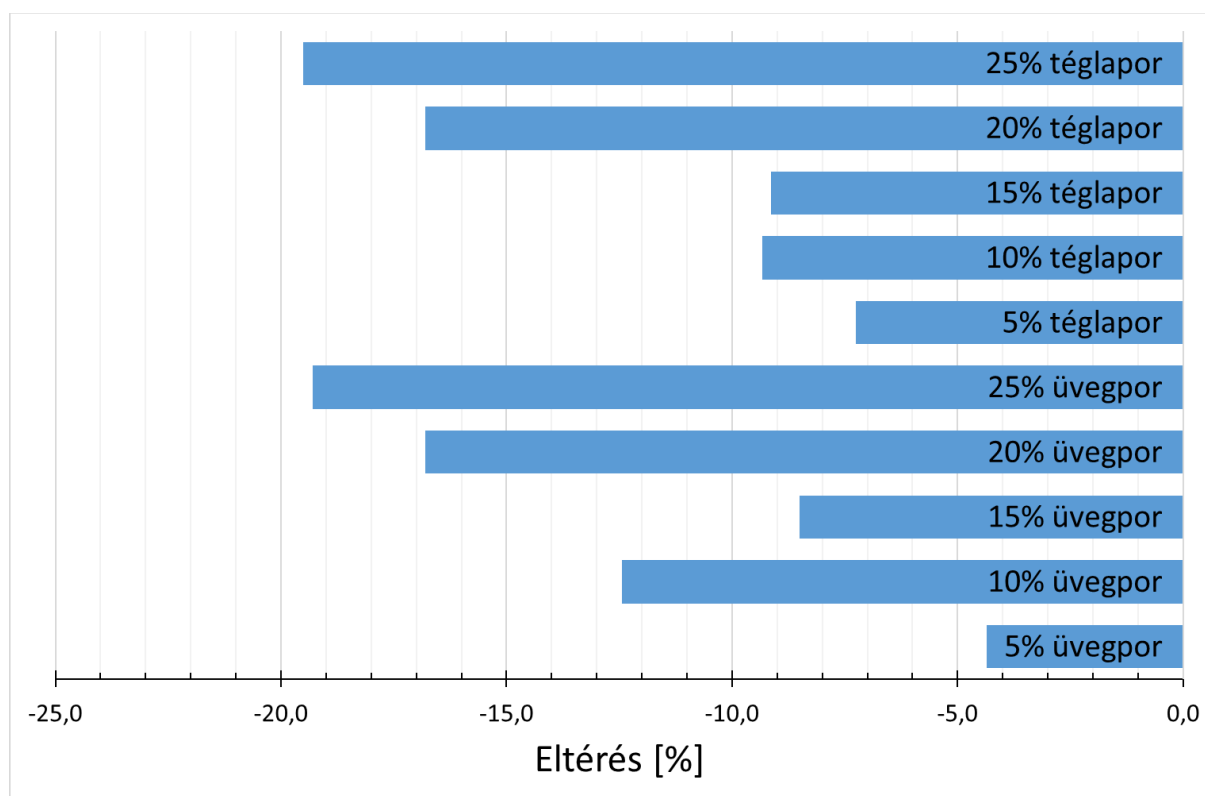
3.2.4. Szilárdságvizsgálat

A kötőanyag szilárdságvizsgálatához az előző pontban leírt MSZ EN 196-1 szabvány [28] szerint készített habarcsokat kiolajozott acél sablonba öntöttem két részletben, amiben 3 darab 40 mm x 40 mm x 160 mm szabványos próbatestet készítettem. A sablont egy automata ejtőasztalhoz rögzítettem, majd 60-60 ejtést követően egy üveglappal lefedve, 90%-os relatív páratartalmú térben tároltam. 24 óra letelte után kizsaluztam a próbatesteket és a 28 napos szilárdságvizsgálatig vízzel telt medencében tároltam. A próbatestek szilárdságát Controls AUTOMAX típusú többfunkciós készülékkel mértem a szabványnak [28] megfelelően.

9. táblázat A kötőanyagok hajlítószilárdsága

Minta		28 napos hajlítószilárdság [MPa]	Szórás [MPa]
Referencia		4,80	0,18
Üveg	5%	4,61	0,21
	10%	4,22	0,28
	15%	4,41	0,09
	20%	4,01	0,13
	25%	3,89	0,07
Tégla	5%	4,47	0,15
	10%	4,37	0,11
	15%	4,38	0,29
	20%	4,01	0,08
	25%	3,88	0,14

A kötőanyagok hajlítószilárdság értékeit a 9. táblázat tartalmazza. A korábbi MSZ 523/4-75 magyar szabvány az egyes próbatestek hajlítószilárdságának átlagtól való eltérését 10%-ban maximalizálta. A referenciához képest a 25 m/m%-ban helyettesített kötőanyagok hajlítószilárdsága csökkent a legnagyobb mértékben (~19%). A 8. ábrán a referencia hajlítószilárdságához viszonyított százalékos eltérések láthatók, általánosan elmondható, hogy 15%-os helyettesítésig 10%-nál kisebbek az eltérések.



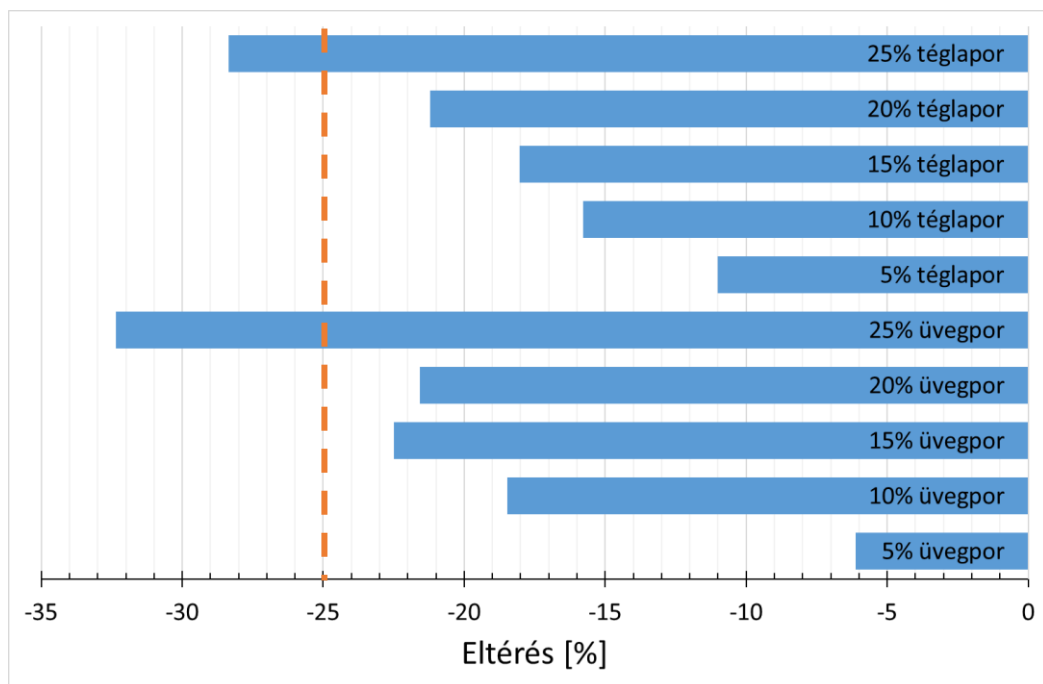
8. ábra A kötőanyagok hajlítószilárdságának százalékos eltérése a referenciától 28 napos korban

A kötőanyagok 28 napos nyomószilárdság értékeit a 10. táblázat foglalja magába. Az üveg- és téglapor helyettesítés növekedésével hasonló ütemben, egyre nagyobb mértékben csökkent a kötőanyag nyomószilárdsága. A 10. ábrán a referencia nyomószilárdságához viszonyított százalékos eltérések láthatók. Az 5% üvegpor helyettesítés kivételével mindegyik kötőanyag nyomószilárdsága 10%-nál nagyobb mértékben csökkent a referenciához viszonyítva.

10. táblázat A kötőanyag 28 napos nyomószilárdsága

Minta		28 napos nyomószilárdság [MPa]	Szórás [MPa]
Referencia		46	1,16
Üveg	5%	43	1,70
	10%	37	1,90
	15%	35	1,54
	20%	36	1,43
	25%	31	1,66
Tégla	5%	40	1,44
	10%	38	1,70
	15%	37	0,99
	20%	36	1,73
	25%	32	1,57

Azonban, ha az amerikai puccolánokra vonatkozó ASTM C 618-as szabványt [30] vesszük figyelembe, a csökkenés maximum 25%-os lehet a referenciához képest. Ennek a feltételnek, ahogy a 9. ábrán is láthatjuk, a 25 m/m%-os helyettesítések kivételével minden kötőanyag megfelel, ami jelzi a kezdeti puccolános hatásukat. Fontos megemlíteni, hogy a szakirodalom [18, 20] szerint a 28 napos szilárdsági adatok esetében még nem látható számottevő változás az alkalmazott helyettesítőanyagoknál, hanem hosszabb távon (56-365 nap) fejtik ki puccolános hatásukat.



9. ábra A kötőanyag nyomószilárdságának százalékos eltérése a referenciától 28 napos korban

4. Összefoglaló

Dolgozatomban hulladék üveg- és téglapor cement helyettesítő anyagként való alkalmazását vizsgáltam. A portlandcementet 5, 10, 15, 20 és 25 m/m%-ban helyettesítettem a hulladékokkal.

Vizsgáltam a különböző mennyiségű tégl- és üveghulladék port tartalmazó kötőanyag vízigényét és a megszilárdult kötőanyagpép fázisösszetételét. A kötőanyagokból szabvány szerint habarcs mintákat készítettem, amelyekkel a terülést (bedolgozhatóságot) és a kötőanyag szilárdságát jellemeztem.

Megállapítottam, hogy az üveg- és téglapor mennyiségének növekedésével hasonlóan nőtt a kötőanyag vízigénye, de 20 m/m%-os helyettesítésig 5%-nál kisebb volt a vízigény növekedése. Kimutattam, hogy a megszilárdult kötőanyagpépben a helyettesítő anyagok 28 napos korban számottevően nem csökkentették a portlandit mennyiségét. Meghatároztam, hogy a hulladék üvegpor javította és a téglapor rontotta a bedolgozhatóságot. A 20 m/m%-os téglaporos helyettesítésnél érthető el a portlandcementhez hasonló bedolgozhatóság. Igazoltam, hogy az üveg- és téglapor helyettesítés növekedésével hasonlóan csökkent a kötőanyag hajlító- és nyomószilárdsága. Ugyanakkor, mindkét hulladék anyaggal készült kötőanyagok a 20 m/m%-os helyettesítésig a mesterséges puccolánokra megadott 25%-os szilárdság-csökkenési határon belül volt.

Összeségében kijelenthető, hogy a hulladék üveg- és téglapor az elvégzett vizsgálatok alapján alkalmasnak tűnik cement helyettesítő anyagnak 20 m/m%-os helyettesítésig. Kisebb nyomószilárdságú szilárdsági osztályba tartozó cementek bizonyosan előállíthatók ezen anyagok nagyobb mértékű alkalmazásával, ezzel is csökkentve a felhasznált cement mennyiségét és az annak előállításával járó környezetterhelést. Ipari alkalmazásához további, hosszabbtávú vizsgálatok szükségesek.

A továbbiakban tervezem ezen hulladékok hosszabb távú (pl. 56 napos) cement hidratációra gyakorolt hatását vizsgálni, illetve a puccolános reaktivitás növeléséhez mechanokémiai aktiválást kívánok alkalmazni.

Irodalomjegyzék

- [1] Monteiro, P., Miller, S., Horvath, A.: Towards sustainable concrete. *Nature Mater.* 16, 698–699, 2017.
- [2] Pluzsik, T., Szegőné, K.É., Urbán, F., Zadravecz, Zs.: *Cembeton útmutató.* Magyar Cement-, Beton- és Mészipari Szövetség, 2017.
- [3] Aïtcin, P.C., Flatt, R.J.: *Science and Technology of Concrete Admixtures.* Woodhead Publishing, 2016.
- [4] MSZ EN 197-1: 2011 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei.
- [5] Kausay, T.: Kötőanyagok IV. Hidraulikus kötőanyagok: Cement 2. *Beton*, 1, 16-18, 2008.
- [6] Tamás, F.: *Szilikátipari kézikönyv.* Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [7] Zhou, W., Duan, L., Tang, S., Chen, E., Hanif, A.: Modeling the evolved microstructure of cement pastes governed by diffusion through barrier shells of C–S–H. *Journal of Materials Science*, 2019.
- [8] Nehme, S. G.: Kiegészítőanyagok hatása a szokványos és az öntömörödő betonokra 1. rész. *Építőanyag*, 67, 28-33, 2015
- [9] Indira, V., Abhitha, K.: A review on recent developments in Zeolite A synthesis for improved carbon dioxide capture: Implications for the water-energy nexus, *Energy Nexus*, Volume 7, 2022.
- [10] Dah-Wei, T. D., Chen, P. H., Ramaraj, R.: The potential of carbon dioxide capture and sequestration with algae, *Ecological Engineering*, Volume 98, 17-23, 2017.
- [11] Czigler, T., Reiter, S., Schulze, P.: *Laying the foundation for zero-carbon cement*, 2020.
- [12] MSZ 4706-1: 1991 Hidraulikus cementkiegészítő anyagok. Általános előírások
- [13] Zarzycki, J.: *Glasses and Amorphous Materials*, VCH Publisher Inc., New York, 1991.
- [14] Rawson, H.: *Properties and Applications of Glass*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- [15] Korányi, Gy.: *Üvegipari kézikönyv*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.

- [16] Jin, W., Meyer, C., Baxter, S.: Glascrete-concrete with glass aggregates, *ACI Mater. J.*, 97, 2, 208–213, 2000.
- [17] Shayan, A., Xu, A.: Value-added utilization of waste glass in concrete, *Cem. Concr. Res.*, 34, 81–89, 2004.
- [18] Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A.: Pozzolan properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cement and Concrete Composites*, Volume 33, Issue 1, 19-29, 2011.
- [19] Halbiniak, J., Major, M.: The Use of Waste Glass for Cement Production, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 585, 2019.
- [20] Aliabdo, A. A., Elmoaty, M., Aboshama, A. Y.: Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 124, 866-877, 2016.
- [21] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S.: Reusing ceramic wastes in concrete, *Construction and Building Materials*, 832-838, 2010.
- [22] Punmia, B. C., Jain, A. K., Jain, A. K.: *Basic Civil Engineering*, 33-35, 2004.
- [23] Navrátilová, E., Rovnaníková, P.: Pozzolan properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 120, 530-539, 2016.
- [24] Wong, C. L., Mo, K. H., Yap, S. P., Alengaram, U. J., Ling, T.: Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 195, 226-239, 2018.
- [25] Aliabdo, A. A., Abd-Elmoaty, M., Hassan, H. H.: Utilization of crushed clay brick in concrete industry, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 53, Issue 1, 151-168, 2014.
- [26] Ouyang, X., Wang, L., Fu, J., Xu, S., Ma, Y.: Surface properties of clay brick powder and its influence on hydration and strength development of cement paste, *Construction and Building Materials*, Volume 300, 2021.
- [27] MSZ EN 196-3: Cementvizsgáló módszerek. 3. rész: A kötési idő és a térfogat-állandóság meghatározása.
- [28] MSZ EN 196-1: Cementvizsgáló módszerek. 1. rész: A szilárdság meghatározása.

- [29] MSZ EN 196-6: Cementvizsgáló módszerek. 3. rész: Az őrlési finomság meghatározása.
- [30] ASTM C 618-94: American Standard for Testing and Materials, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, 1994.
- [31] Abrams, D.A.: Design of Concrete Mixtures. Vol. 1, 1919.
- [32] MSZ EN 1015-3:1999/A2:2007: Falszerkezeti habarcsok vizsgálati módszerei. 3.rész: A friss habarcs konzisztenciájának meghatározása (ejtőasztallal).