



Cementkötésű anyagok kémiai korróziójának és ellenállóképességének tanulmányozása

TDK dolgozat

Somlai Bálint III. évf., Kováts Marcell III. évf.

Konzulensek:

Dr. Kopecskó Katalin, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék,

Dr. Balázs L. György, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék



2019

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	6
2. CÉLKITŰZÉSEK	7
2.1. NEMZETKÖZI VISZONYLATOK	7
2.2. A PROJEKT JELENTŐSÉGE	7
3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	9
3.1. SAVAK BETONOKRA GYAKOROLT HATÁSA	9
3.2. SZERVES SAVAK (ECETSAV, TEJSAV)	9
3.3. KÉNSAV	10
4. KÍSÉRLETI TERV	11
5. ANYAGOK	13
5.1. ANYAGOK	13
5.1.1. CEMENTEK	13
5.1.2. ŐRÖLT KOHÓSZALAK	13
5.1.3. FOLYÓSÍTÓSZEREK	14
5.2. PRÓBATESTEK	14
5.2.1. CEMENTPÉP PRÓBATESTEK	14
5.2.2. HABARCS PRÓBATESTEK	15
5.3. MÓDSZEREK	18
5.3.1. SAVKORRÓZIÓS VIZSGÁLAT CEMENTPÉP PRÓBATESTEKEN	18
5.3.2. HAJLÍTÓ- ÉS NYOMÓSZILÁRDSÁGI VIZSGÁLAT	19
5.3.3. KAPILLÁRIS VÍZFELSZÍVÁS	20
5.3.4. TELJES ELMERÍTÉSES VÍZFELVÉTEL	21
5.3.5. KLORIDION MIGRÁCIÓS VIZSGÁLAT	21
5.3.6. PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓPOS MEGFIGYELÉSEK	22
5.3.7. HIGANYPENETRÁCIÓS POROZIMETRIA	23
5.3.8. HÉLIUMPIKNOMÉTERES ANYAGSŰRŰSÉG MEGHATÁROZÁS	24
6. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	26
6.1. CEMENTPÉPEK SAVKORRÓZIÓS VIZSGÁLATA	26
6.2. HABARCSOK HAJLÍTÓ ÉS NYOMÓSZILÁRDSÁGA	33
6.3. HIGANYPENETRÁCIÓS POROZIMETRIA	40
6.4. HÉLIUMPIKNOMÉTERES SŰRŰSÉGMÉRÉS	44
6.5. KAPILLÁRIS ÉS TELJES ELMERÍTÉSES VÍZFELVÉTEL	45
6.6. PÁSZTÁZÓ ELEKTRON MIKROSKÓPOS MEGFIGYELÉSEK	48
6.6.1. ECETSAVAS KEZELÉS	48
6.6.2. KÉNSAVAS KEZELÉS	50
6.6.3. TEJSAVAS KEZELÉS	53
6.7. KLORIDION MIGRÁCIÓ	54
7. ÖSSZEFOGLALÁS	56

Képjegyzék

<i>Kép 5.3-1: Cementpép próbatestek savkezelés előtt (saját fénykép)</i>	19
<i>Kép 5.3-2: Cementpép próbatestek savkezelés után (saját fénykép)</i>	19
<i>Kép 5.3-3: Hajlítószilárdság mérése (saját fénykép)</i>	20
<i>Kép 5.3-4: Nyomószilárdság mérése fél próbatesten (saját fénykép)</i>	20
<i>Kép 5.3-5: Kapilláris vízfelvétel mérése (saját fénykép)</i>	21
<i>Kép 5.3-6: Teljes elmerítéses vízfelvétel (saját fénykép)</i>	21
<i>Kép 5.3-7: A kloridion migrációs vizsgálathoz használt eszköz (saját fénykép)</i>	22
<i>Kép 5.3-8: A héliumpiknométeres sűrűségmérő készülék (a képet a SZIKKTI Labor Kft. küldte)</i>	25
<i>Kép 6.6-1: R1 cementpép, 8 hétig tartó pH = 3 ecetsavban történő tárolást követően, M=900x (saját felvétel)</i>	48
<i>Kép 6.6-2: R1 cementpép, póruskitöltés, 8 hétig tartó pH = 3 ecetsavban történő tárolást követően, M=5500x (saját felvétel)</i>	49
<i>Kép 6.6-3: R1 cementpép, a törési felületet benövő Ca-acetát kristályokkal, 8 hétig tartó pH = 3 ecetsavban történő tárolást követően, M=5500x (saját felvétel)</i>	50
<i>Kép 6.6-4: R1 cementpép, 8 hétig tartó pH = 1 kénsavban történő tárolást követően, M=630x (saját felvétel)</i>	51
<i>Kép 6.6-5: R1 cementpép, pórus, 8 hétig tartó pH = 1 kénsavban történő tárolást követően, M=2150x (saját felvétel)</i>	52
<i>Kép 6.6-6: R1 cementpép, repedést kitöltő gipszcsomó, 8 hétig tartó pH = 1 kénsavban történő tárolást követően, M=2150x (saját felvétel)</i>	53
<i>Kép 6.6-7: R1 cementpép, pórust kitöltő csapadék, 8 hétig tartó pH = 3 tejsavban történő tárolást követően, M=5500x (saját felvétel)</i>	54

Táblázatjegyzék

<i>Táblázat 5.2-3: R1 habarcs receptúrája</i>	16
<i>Táblázat 5.2-4: R2 habarcs receptúrája</i>	16
<i>Táblázat 5.2-5: R3 habarcs receptúrája</i>	17
<i>Táblázat 5.2-6: R4 habarcs receptúrája</i>	17
<i>Táblázat 5.2-7: R5 habarcs receptúrája</i>	17
<i>Táblázat 5.2-8: R6 habarcs receptúrája</i>	18
<i>Táblázat 6.3-1: 28 napos cementpépek higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei</i>	41
<i>Táblázat 6.3-2: 56 napos cementpépek higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei</i>	42

Táblázat 6.3-3: 91 napos cementpépek higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei _42

Táblázat 6.3-4: 28 napos habarcsok higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei ___43

Táblázat 6.3-5: 56 napos habarcsok higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei ___43

Táblázat 6.3-6: 182 napos habarcsok higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei __44

Ábrajegyzék

Ábra 5.3-1: A héliumpiknométeres vizsgálat eszközének sematikus ábrája (az ábrát a SZIKKTI Labor Kft. küldte) _____24

Ábra 6.1-1: REF körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága _____27

Ábra 6.1-2: KS-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága _____27

Ábra 6.1-3: KS-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában _____28

Ábra 6.1-4: KS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága _____28

Ábra 6.1-5: KS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában _____29

Ábra 6.1-6: ES-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága _____29

Ábra 6.1-7: ES-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában _____30

Ábra 6.1-8: ES-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága _____30

Ábra 6.1-9: ES-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában _____31

Ábra 6.1-10: ES-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága _____31

Ábra 6.1-11: TS-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában _____32

Ábra 6.1-12: TS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága _____32

Ábra 6.1-13: TS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában _____33

<i>Ábra 6.2-1: R0 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága</i>	<i>34</i>
<i>Ábra 6.2-2: R1 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága</i>	<i>34</i>
<i>Ábra 6.2-3: R2 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága</i>	<i>35</i>
<i>Ábra 6.2-4: R3 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága</i>	<i>35</i>
<i>Ábra 6.2-5: R4 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága</i>	<i>36</i>
<i>Ábra 6.2-6: R5 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága</i>	<i>36</i>
<i>Ábra 6.2-7: R6 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága</i>	<i>37</i>
<i>Ábra 6.2-8: R0 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága</i>	<i>37</i>
<i>Ábra 6.2-9: R1 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága</i>	<i>38</i>
<i>Ábra 6.2-10: R2 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága</i>	<i>38</i>
<i>Ábra 6.2-11: R3 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága</i>	<i>39</i>
<i>Ábra 6.2-12: R4 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága</i>	<i>39</i>
<i>Ábra 6.2-13: R5 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága</i>	<i>40</i>
<i>Ábra 6.2-14: R6 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága</i>	<i>40</i>
<i>Ábra 6.4-1: Habarcs hasábok sűrűségei 28, 56, 91, 182 napos korokban, héiumpiknométeres vizsgálattal mérve</i>	<i>45</i>
<i>Ábra 6.4-2: Cement kockák sűrűségei 28, 56, 91, 182 napos korokban, héiumpiknométeres vizsgálattal mérve</i>	<i>45</i>
<i>Ábra 6.5-1: Kapilláris és teljes elmerítéses vízfelvétel 28 napos korban keverékenként, szobaszáraz próbatesteken mérve</i>	<i>46</i>
<i>Ábra 6.5-2: Kapilláris és teljes elmerítéses vízfelvétel 1 éves korban keverékenként, kiszáritott próbatesteken mérve</i>	<i>47</i>
<i>Ábra 6.7-1: 28 napos habarcs korongok kloridion migrációs koefficiensei keverékenként</i>	<i>55</i>
<i>Ábra 6.7-2: 1 éves habarcs korongok kloridion migrációs koefficiensei keverékenként</i>	<i>55</i>

1. Bevezetés

Az épített környezetünket jelentősen meghatározó vasbeton szerkezetek biztonságosabb és hosszabb élettartamú használata fontos szempont. A beton többkomponensű anyagi rendszer, amelynek viselkedését (szilárdságát, tartósságát és egyéb tulajdonságait) jelentős részben összetevőinek tulajdonságai határozzák meg. A kutatási feladat elsődleges célja, hogy a szokványos betonokhoz képest az agresszív közegekkel ($\text{pH} < 5$) szemben nagyobb ellenálló képességgel rendelkező cementkötést biztosítsunk. Mindezen elvárások elsősorban anyagtani, ill. anyagtudományi megközelítéseket igényelnek. Vizsgálataink kiterjednek gyári és laboratóriumi cementek, valamint felhasználásukkal készült cementkötésű anyagok (habarcsok) széleskörű vizsgálataira. Az agresszív vizes környezetek hatását modellkísérletekkel, új kísérleti módszerek kidolgozásával és alkalmazásával vizsgáljuk.

A cementkötésű anyagokat (habarcs, cementpép) érő agresszív kémiai hatásokat eltérő jellegű (ásványi – kénsav és szerves – ecetsav, tejsav) savas környezettel, valamint abrúziós hatás mentesen és abrúziós hatással is vizsgáltuk. Ezen kívül a próbatesteket a kísérleti körülmények közé eltérő korokban (28 vagy 182 napos kortól), de azonos időtartamra (8 hét) helyeztük el.

A kísérleti körülmények hatására végbement változásokat a következő módszerekkel követtük nyomon: szilárdság vizsgálat, testsűrűség – annysűrűség, pórusméret-eloszlás higanyintrúziós vizsgálattal, behatolási frontok vizsgálata pásztázó elektronmikroszkópos módszerrel. Az eredmények alapján meghatározható a betonok első környezeti terhelésre alkalmas kora, valamint javaslatot tudunk tenni a megfelelő cementválasztásra, illetve a kísérleti módszerekre, a savkorrózióknak fokozottan ellenálló beton vizsgálati módszereinek egységes használatára.

2. Célkitűzések

A kísérlet célja különböző cementkiegészítő anyagokkal készült laboratóriumi cementek ellenállóképességének tanulmányozása a leggyakrabban előforduló savtípusokkal szemben, tesztelve azok szilárdságát, mérve sűrűségeiket (test és anyagsűrűség) és azok változását, megfigyelve a behatolási mechanizmusokat, továbbá megfigyelve a keverékekben lefolyt változásokat elektronmikroszkópos képek segítségével. További célunk volt meghatározni, hogy az egyes keverékek milyen gyorsasággal érik el a rájuk jellemző savállóságot.

2.1. Nemzetközi viszonylatok

Jelenleg nincsen nemzetközileg elfogadott savkorrózió vizsgálati szabvány, nincsenek szabványos kísérletek. Az Eurocode szerinti legmagasabb kémiai ellenállósági környezeti osztály (XA3) is csupán 4-nél nagyobb pH-ra vesz figyelembe, ami nem elegendő egyes építmények reális besorolására (Sokołowska és Woyciechowski, 2018). Ezen szabályozatlanság egyik fő oka, hogy a nagy számú korróziót befolyásoló folyamatból nem lehet mindet szabályozni és pontosan meghatározni a folyamatok hatásait. Ezen kívül a beton reakcióba lép minden közeggel így nehéz olyan kísérletet készíteni, amiben egyértelműen azonosíthatók az egyes korróziós folyamatok okozói, például szerves savak esetén kérdéses a közegben levő mikroorganizmusok szerepe a korróziós folyamatban.

Az MSZ 4798:2016/2M:2018 szabványban (Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon), a nemzeti alkalmazási dokumentumban bevezették az eredeti szabványban szereplő XA1, XA2 és XA3 környezeti osztályok mellett az „Egyéb agresszív vizek és folyadékok stb. (alapvetően oldódásos és esetleg duzzadásos) kémiai korróziójának ellenálló beton, vasbeton és feszített vasbeton „szerkezetek”-re az XA4(H), XA5(H) és XA6(H) környezeti osztályokat (Kausay, 2018). A szabvány megfogalmazza az alkalmazási területet az enyhén agresszívtól a fokozottan agresszív környezetben, valamint ennek a beton minőségére vonatkozó feltételrendszerét.

2.2. A projekt jelentősége

A korrózió jelenti az egyik legnagyobb veszélyt mind a cementkötésű anyagokra, mind az acélra és ezzel áttételesen a vasbetonra betonra is. A korrózió legtöbbször elkerülhető olyan helyszínek választásával, amelyek nem agresszív környezetben helyezkednek el, ám az emberi terjeszkedés és a fejlődő infrastruktúra megkívánja, hogy ilyen környezetekben is képesek

legyünk tartós építményeket létrehozni. Ennek több lehetséges módja van, köztük a bevonatos védelem és a saválló anyagok használata, azonban ezek általában túlságosan drágák, így egyre növekvő igény van savkorrózióknak fokozottan ellenálló cementek és betonok előállítására. Az agresszív környezetek sok típusát ismerjük, amelyek mind különböző roncsolási és behatolási mechanizmusokkal rendelkeznek. Ezekre a mechanizmusokra teszteltünk több potenciálisan ellenállóbb laboratóriumi cement típust. A laboratóriumi cementek kereskedelmi forgalomban kapható cementek keverékei, vagy cement és kiegészítő anyag keveréke, amelyektől fokozott ellenállóképességet várunk. Ez egy átfogó vizsgálat egy olyan területen, ahol rengeteg változó és paraméter befolyásolja a folyamatokat és nehéz pontos következtetéseket levonni. Ez a tanulmány egy nagyobb projekt része, amely különféle cementkiegészítők savállóságra tett hatásait hivatott felmérni: kísérleteink kapcsolódtak az Építőmérnöki Karon jelenleg is futó NVKP_16-1-2016- 0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című kutatáshoz, amely során többek között különböző kötőanyag kombinációk tulajdonságait, szilárdulási hajlamát, ellenálló képességét és tartósságát vizsgálják.

3. Szakirodalmi áttekintés

3.1. Savak betonokra gyakorolt hatása

A beton alap esetben egy lúgos kémhatású anyag (pH: ~12,4), amelyre így a savas környezetek jelentős veszélyt jelentenek. A beton porozitásának köszönhetően a savas kémhatású folyadékok nagy felületen képesek kárt okozni a betonban. Jól ismert a tény miszerint a savak megváltoztatják a beton belső pH-értékét, amivel megszüntetik a betonvas korrózióvédelmét, azonban a savak hasonlóan káros hatással lehetnek a beton szilárdságára is. Mivel a modern építőiparban egyre több olyan helyen is használunk betont vagy vasbetont, ahol azok savas környezetnek lehetnek kitéve (élelmiszeripar, mezőgazdaság, szennyvízkezelés stb.) fontos, hogy más agresszív vizes környezetek (sós víz, agresszív széndioxid tartalmú (szénsavas) víz stb.) mellett a savas környezeteknek jobban ellenálló betontípusok tanulmányozása.

A betonok savállóságának vizsgálatakor legfontosabb a cement kötés vizsgálata mivel a beton alkotói közül ez a legérzékenyebb savkorrózióra (amennyiben nem karbonátos közet a beton adalékanyaga). Ezen indokból kifolyólag a savkorróziós vizsgálatokat cementpép próbatesteken végeztük az 5.3.1. fejezet szerinti módon.

3.2. Szerves savak (ecetsav, tejsav)

Savállóság meghatározásnak szempontjából a legtöbb problémát a szerves savak okozzák, ugyanis szinte sosem fordulnak elő „egyedül”. A leggyakrabban előforduló szerves savas környezetek a mezőgazdasághoz és a szennyvízkezeléshez kapcsolódnak, kísérleti úton nehéz hasonló körülményeket biztosítani a kémiai folyamatokhoz (Alexander et al. 2013) (Breton et al. 2017). Ennek eredménye az lehet, hogy míg egy bizonyos savra tervezett beton elem e tervezett savnak megfelelően ellenáll, a nem tervezett agresszív környezet nem várt károkat okozhat benne. Ezen komplex biológiai és kémiai környezetek modellezése igen nehéz feladat és bár léteznek modellek (De Windt és Devillers, 2010) ezek a savak típusát és összetételét bemenő adatként kezelik, így nehezen előre látható, hogy mekkora lesz egy adott beton építmény ellenálló képessége. Kísérletünkhöz két szerves savat választottunk, melyek a leggyakrabban fordulnak elő a mezőgazdasági és ipari (pl. élelmiszeripari) környezetekben.

Az általunk választott savak az ecetsav és a tejsav. Ecetsav több biológiai bomlási folyamat során is keletkezhet így a mezőgazdasági ipar több területén előfordul, így például silózásnál, biológiai szemét bomlásakor, állati melléktermék bomlásakor, cukorgyártásnál vagy akár borászatban is. Ezen kívül ecetsav megtalálható a szennyvizekben is. A tejsav,

növényi anyagokból is keletkezhet cukrok bomlásának termékeként így gyakran előfordul silókban, de akár a sajtgyártásban is. (Alexander et al. 2013) (Breton et al. 2017)

A szerves savak korróziója során jellemzően a savak reakcióba lépnek a cement-mátrixban található hidratált fázisokkal, mint a portlandittal (Ca(OH)_2). Ezen reakciók termékei vízben oldódó sók, amiket azok oldhatóságának függvényében a vizes közeg „kimos” a pórusokból a vizes közeg. Így a cement mátrix lassan lebomlik és így a beton „szétesik”. A folyamatot befolyásolhatja továbbá, hogy a savval való reakció termékei kötődnek-e a pórusok falára, mivel amennyiben tapadnak, úgy lassítják a korróziós folyamatot. Ezért fontosnak tartottuk abrázios hatással terhelt teszteket is folytatni és megfigyelni milyen hatása van annak egyes savaknál. (Alexander et al. 2013) (Rehacek, 2018) (Dyer, 2017)

3.3.Kénsav

Az infrastruktúra fenntartás szempontjából egyik legfontosabb környezeti hatás a kénsav hatása. Az organikus keletkező kénsav szinte minden szennyvízben előfordul a világ minden pontján, ahol a létesítmények felületein baktériumok kénsavat termelnek metabolikus folyamataik melléktermékeként. Ez több tíz milliárd Eurós károkat okoz évente a világon (Yuan et al. 2013) (Xie et al. 2019) a beton anyagú csövekben, szennyvíztisztító üzemekben és egyéb helyeken. A szennyvíztisztítás építményein kívül hasonló problémák merülhetnek fel erőművek hűtőtornaiban, ahol a szennyvízcsatornához hasonlóan mikroorganizmusok által előállított kénsav jelenhet meg. A savat előállító baktériumok a hűtőtornyok hatékonyságának csökkenését okozzák míg, ha az általuk termelt savat figyelmen kívül hagyja az üzemeltető az komoly károkat okozhat a szerkezetben. A szerkezeti károk elkerülése véget karbantartás idejére azonban le kell állítani az erőművet, ami jelentős bevételkiesést jelenthet (Barrett, 2013). Ezért fontos ezeknek az agresszív környezeteknek megfelelő betonok kutatása, illetve a korróziós folyamat megértése.

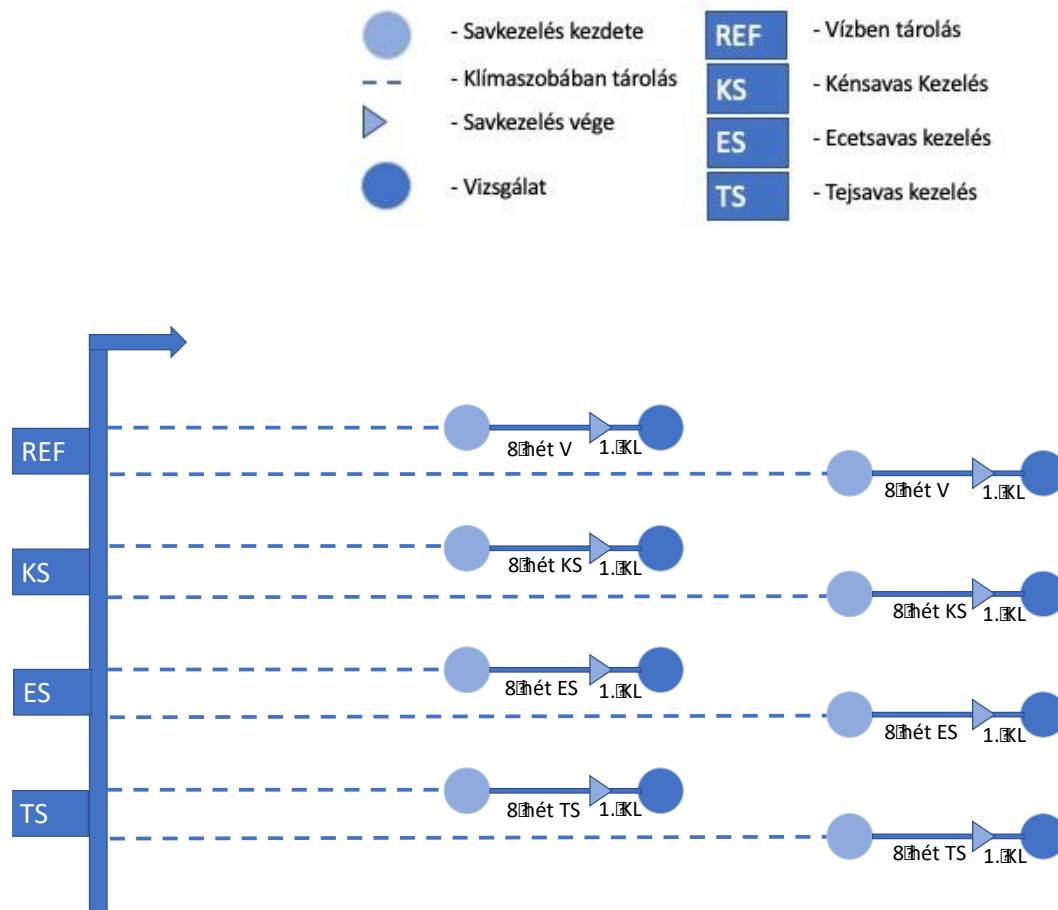
A szennyvizekben található kénes vegyületek először kén-hidrogénné H_2S redukálódnak, amely a levegőben levő oxigénnel reakcióba lépve szulfátot SO_4 képez, amit az itt élő baktériumok metabolikus folyamataik során kénsavvá alakítanak (Weber, 2005) (Yuan et al. 2013). A kénsav korróziója során reakcióba lép a cement-mátrixban levő portlandittal Ca(OH)_2 , így gipsz $\text{Ca(SO)}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ és később ún. másodlagos ettringit $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_32$ képződik. Ahogyan Xie (2019) írja, még vannak bizonytalan pontok és eltérő feltételezések a

gipsz és az ettringit szerepéről a korróziós folyamatban. Ezt a bizonytalanságot jól mutatja, hogy például Davis (1998) Houston csatornarendszerének vizsgálatakor a kénsav által korrodált csövekből vett mintáiban nem talált ettringitet a behatolási zónában. Azonban az biztos, hogy az másodlagos ettringit képződés rendkívül előnytelen hatásokkal jár mivel képződésekor belső feszültség keletkezik a betonban és amennyiben a feszültség meghaladja a cement húzószilárdságát, mikrorepedések jönnek létre. A mikrorepedések tovább segítik a sav behatolását a beton belsejébe, ezzel felgyorsítva a korróziós folyamatot és gyorsítva a tönkremenetelt (Alexander et al. 2013) (Xie et al. 2019).

4. Kísérleti terv

A kutatási feladat célkitűzéseinek megfelelően különböző tulajdonságú, kereskedelmi forgalomban kapható, valamint laboratóriumban, kísérleti céllal létrehozott cementek ellenállóképességét tanulmányoztuk agresszív (savas) kémiai körülmények között. A savas körülmények közé a próbatestek különböző korokban kerültek. Ezzel azt próbáltuk megállapítani, vajon a próbatesteket 28 napostól eltérő korokban érő hatásoknak jobban ellen tudnak-e állni. A próbatestek ellenállóképességét különféle savas közegekben: kénsavas oldatban (pH=1), ecetsavas, illetve tejsavas oldatban (pH=3) tanulmányoztuk. Hetente végeztünk savcserét. Az oldat és a kezelt próbatestek tömeg aránya megközelítőleg 1:10 volt. A kezelések 28 napos, illetve 180 napos korban kezdődtek, és 8 héten át tartottak. Minden körülményben kétféleképpen kezeltük a próbatesteket: abrúziós hatással (hetente savcsere során a keletkezett reakcióterméket, illetve fellazult szemcséket lekeféltük), valamint abrúziós hatás nélkül. Referenciaként a próbatesteket vízben tároltuk. A próbatestek tömegváltozását és

nyomószilárdságát a 8 hetes kezelést követően, a vizes közegekből kivéve és 2 héten át klímakamrában történő tárolást követően mértük (Kép 3.1-2).



Kép 3.3-1: Kísérleti terv

5. Anyagok

5.1. Anyagok

5.1.1. Cementek

Kísérleteink során az alábbi, kereskedelmi forgalomban lévő cementeket vizsgáltuk, illetve használtuk fel laboratóriumi cement keverékek előállítására. Ezekből habarcs és cementpép próbatesteket készítettünk.

- CEM I 42,5N-SR0: Nagy szilárdságú szulfátálló cement, amely C_3A -mentes portlandklinker és kötőanyagkeveréke. Elsősorban szulfát és egyéb vegyi anyag álló és víz alatti szerkezetek építésére használják. Szulfátállóságát annak köszönheti, hogy nem tartalmaz trikálcium alluminátot (C_3A)
- CEM I 52,5R: Nagy kezdő és végszilárdságú portlandcement, amelyet vasbeton és feszített-vasbeton szerkezetek előállítására használják.
- CEM II/A-S 42,5N: Kohósalak-portlandcement és kötőanyagkeveréke. Enyhén agresszív környezetnek ellenálló és a mészkivirágzást csökkentő tulajdonságú.
- CEM III/A 32,5N: A CEM II/A-S cementhez hasonló tulajdonságú kohósalak cement.

5.1.2. Őrölt kohósalak

A granulált kohósalakot nyersvasgyártás során állítják elő a keletkező olvadt salak hirtelen lehűtésével. Szerkezete amorf, üveges állapotú, nem kristályosodik ki. Összetétele hasonlít a portlandcementéhez, ehhez képes eltérő arányban, főként kalcium-oxid (CaO), szilícium-dioxid (SiO_2), alumínium-oxid (Al_2O_3), vas-oxid- (Fe_2O_3) és magnézium-oxid (MgO) alkotják, egyéb, kis mennyiségű oxid mellett. A granulált kohósalak összetétele miatt önálló hidrát vegyületeket is képez, latens hidraulikus tulajdonságokkal rendelkezik. Előnyei, hogy a betonban nagy utószilárdulást, mérsékelt hőfejlődést, kis repedésérzékenységet, valamint kiváló szulfát- és korrózióállóságot eredményez.

Alkalmas nagy szilárdságú és nagy teljesítőképességű betonok előállítására. (Fucic et al. 2016): A cementgyártás kiinduló alapanyagaként használható a mészkő egy részének helyettesítésére. További előnye ennek a felhasználási módnak, hogy a klinkerégetés kevesebb energiát igényel és a CO_2 kibocsátása is csökken, mivel a kalcium egy része CaO -ként van jelen, nem pedig $CaCO_3$ -ként. Önmagában, hidraulikus kötőanyagként alkalmazható, viszont ekkor szükség van a kohósalak mellett egy indukátor anyagra is, ami segít beindítani a hidratációt. Ez lehet alkalikus (pl. portlandcement) vagy szulfátos (pl. gipsz). Cementek hidraulikus kiegészítő anyagaként használják fel a legnagyobb mennyiségben. Készülhetnek

együtt őrléssel, vagy a portlandcement és külön őrlött kohósalak keverésével. (Opoczky és Gável, 2003). Granulált kohósalak továbbá nagy mennyiségben kerül felhasználásra útalapokba, talajstabilizáláshoz, vízepítési létesítményekhez, könnyűbeton alapanyagként és mezőgazdasági célokra.

A kohósalak a tiszta portlandcementnél több szilícium-dioxidot (SiO_2) és kevesebb kalcium-oxidot (CaO) tartalmaz, ezért a hidratáció folyamán nagyobb mennyiségű kalcium-szilikát-hidrát (CSH) képződik, ezzel egyidejűleg kevesebb kalcium-hidroxid szabadul fel. A kialakuló szerkezet tömörebb kristályszerkezetű. A reakciót lassabb lefolyás jellemezi, mivel a lúgos közeg kialakulásához időre van szükség, ezt pedig csak a portlandcement biztosítja. A kötőhő csökkenthető granulált kohósalak adagolásával, ez kedvező tömegbetonok készítése során, vagy nyári betonozáskor. További előnye, hogy csökken a beton áteresztő képessége, csökken a kloridbehatolás mértéke, javul a szulfátállóság és csökken az alkáli-szilika reakció (ASR) veszélye.

5.1.3. Folyósítószer

Beton folyósítószer használata lehetővé teszi, hogy kevesebb vízzel lehessen elkészíteni a keveréket, ez kisebb porozitást eredményez, ami kedvezőbb savállóság szempontjából. Emellett a próbatestek gyártásának sebességét is segíti, mivel csökkenti a keveréshez szükséges időt. A habarcsok keverékekhez MC-Poweflow 2695 típusú folyósítószerrel használtunk.

5.2. Próbatestek

5.2.1. Cementpép próbatestek

A savállóságot cementpép próbatesteken tanulmányoztuk, mivel a betonok savkorróziójakor az esetek túlnyomó többségében a cement tönkremenetele mérvadó. A cementpép próbatesteket folyósítószer nélkül készülték, ahol a keverővíz kissé képlékeny konzisztencia eléréséhez szükséges mennyiségű adagolásával értük el. A cementekből 30x30x30 mm-es kockákat készítettünk. A keverékek összetételei az *5.2-1 táblázatban* olvashatók.

- R0: CEM I 42,5 R-SR0
- R1: CEM I 52,5 R
- R2: CEM II/A-S 42,5 N
- R3: CEM III/A 32,5 N
- R4: 87,6% CEM I 52,5 R + 12,3 % CEM III/A 32,5 N

(ezzel a keveréssel előállítunk egy ugyanolyan kohósalak tartalmú cementet, mint a CEM II/A (=R2).

- R5: 92,0 % CEM I 42,5SR0 + 8 % GGBS (tornai szlovák CRH-s 4300-as őrlt kohósalak).
- R6: 86,6% CEM I 42,5 SR0 + 13,4 % CEM III/A 32,5 N (ennek a kohósalak tartalma ugyanannyi, mint az előző keveréké).

A keverékek pontos összetételei az 5.2-1 táblázatban olvashatók.

Keverékek	tömeg [g]	Cement típusa	Víz tömeg [g]
R0	600	CEM I 42,5N-SR0	178
R1	600	CEM I 52,5R	186
R2	600	CEM II/A-S 42,5N	169
R3	600	CEM III/A 32,5N	190
R4	520	CEM I 52,5R	181
	80	CEM III/A 32,5N	
R5	552	CEM I 42,5N-SR0	179
	48	kohósalak	
R6	520	CEM I 42,5N-SR0	178
	80	CEM III/A 32,5N	

Táblázat 5.2-1: A cementpép kockák készítéséhez használt receptúrák

5.2.2. Habarcs próbatetek

A cementek hatásait a beton tulajdonságaira (szilárdsági, tömegösszetételi és hidrotechnikai) habarcs próbatetekben vizsgáltuk, amelybe 0.08-2mm szemmagyságú homokfrakciókat is raktunk, így modellezve a cementek és a beton adalékanyagok kapcsolatait. A habarcsokból 40x40x160 mm-es hasábokat és Ø100/200-as hengereket készítettünk. A habarcs keverékek receptúrái a 5.2-2 – 5.2-8 táblázatokban olvashatók.

R0			
anyag	típus	tömeg [kg/m ³]	tömeg/keverék [g/8,17 l]
cement +kiegészítő	CEM I 42,5N-SR0	520	4250
homok	0,2-1 mm	686	5605

	0,08-0,25 (F36)	294	2400
víz	V/C=0,4	208	1700
folyósítószer	MC-Powerflow 2695		15

Táblázat 5.2-2: R0 habarcs receptúra

R1			
anyag	típus	tömeg [kg/m ³]	tömeg/keverék [g/8,17 l]
cement +kiegészítő	CEM I 52,5R	520	4250
homok	1-2 mm	653	5335
	0,2-1 mm	686	5605
	0,08-0,25 (F36)	294	2400
víz	V/C=0,4	208	1700
folyósítószer	MC-Powerflow 2695		20-22

Táblázat 5.2-3: R1 habarcs receptúrája

R2			
anyag	típus	tömeg [kg/m ³]	tömeg/keverék [g/8,17 l]
cement +kiegészítő	CEM II/A-S 42,5N	520	4250
homok	1-2 mm	653	5335
	0,2-1 mm	686	5605
	0,08-0,25 (F36)	294	2400
víz	V/C=0,4	208	1700
folyósítószer	MC-Powerflow 2695		25

Táblázat 5.2-4: R2 habarcs receptúrája

R3			
anyag	típus	tömeg [kg/m ³]	tömeg/keverék [g/8,17L]
cement +kiegészítő	CEM III/A 32,5N	520	4250
homok	1-2 mm	653	5335
	0,2-1 mm	686	5605
	0,08-0,25 (F36)	294	2400

víz	V/C=0,4	208	1700
folyósítószer	MC-Powerflow 2695		25

Táblázat 5.2-5: R3 habarcs receptúrája

R4			
anyag	típus	tömeg [kg/m ³]	tömeg/keverék [g/8,17L]
cement +kiegészítő	CEM I 52,5R		3683
	CEM III/A 32,5N		567
homok	1-2 mm	653	5335
	0,2-1 mm	686	5605
	0,08-0,25 (F36)	294	2400
víz	V/C=0,4	208	1700
folyósítószer	MC-Powerflow 2695		30

Táblázat 5.2-6: R4 habarcs receptúrája

R5			
anyag	típus	tömeg [kg/m ³]	tömeg/keverék [g/8,17L]
cement +kiegészítő	CEM I 42,5N-SR0		3910
	kohósalak		340
homok	1-2 mm	653	5335
	0,2-1 mm	686	5605
	0,08-0,25 (F36)	294	2400
víz	V/C=0,4	208	1700
folyósítószer	MC-Powerflow 2695		23

Táblázat 5.2-7: R5 habarcs receptúrája

R6			
anyag	típus	tömeg [kg/m ³]	tömeg/keverék [g/8,17L]
cement +kiegészítő	CEM I 42,5N-SR0		3683
	CEM III/A 32,5N		567
homok	1-2 mm	653	5335
	0,2-1 mm	686	5605

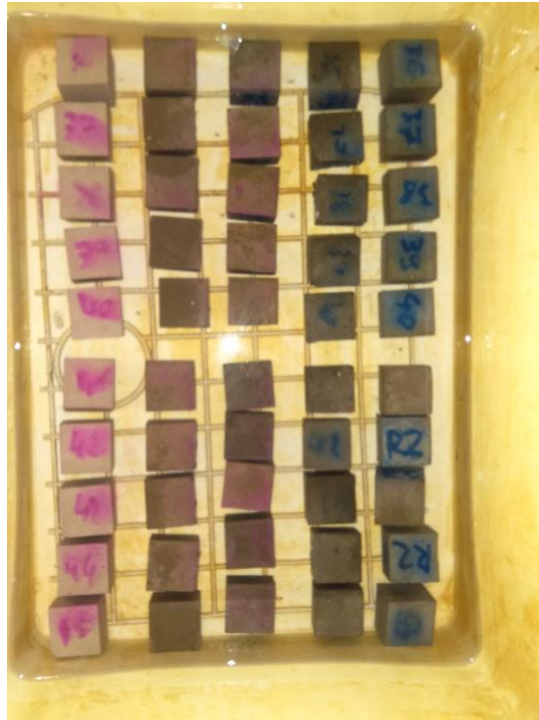
	0,08-0,25 (F36)	294	2400
víz	V/C=0,4	208	1700
folyósítószer	MC-Powerflow 2695		30

Táblázat 5.2-8: R6 habarcs receptúrája

5.3.Módszerek

5.3.1. Savkorróziós vizsgálat cementpép próbatesteken

A vizsgálatot 30x30x30 mm-es próbatestekkel végeztük melyeket legyártásuk után szobahőmérsékleten tároltunk. Savas körülményenként 10-10 próbatestet használtunk, amelyek közül ötöt hetente abráziós hatással terheltünk (felület tisztítás sválló műanyag kefével). A próbatestek 8 hetet töltöttek a savas környezetben, amely időszak során a savas oldatot rendszeresen (hetente) cseréltük annak érdekében, hogy pH-juk a megfelelő értéken maradjon. A próbatesteket úgy helyeztük el, hogy minden oldaluk érintkezzen a savval. Megmértük a próbatestek méreteit és tömegét a vizsgálat előtt és utána is. Savkezelést követően 2 hétig tároltuk a klímaszobában a próbatesteket, majd nyomószilárdság vizsgálatot végeztünk az MSZ EN 12390-3:2009 (Magyar Szabványügyi Testület, 2009a) szabvány szerint. 2,4 kN/s-os sebességgel terheltük a próbatesteket. Az eredményeket átlagoltuk és így kaptuk a végső eredményeket. Referenciaként vízben tárolt próbatestek testsűrűségét és nyomószilárdságát is mértünk ugyanezen eljárásokkal.



Kép 5.3-1: Cementpép próbatetek savkezelés előtt (saját fénykép)



Kép 5.3-2: Cementpép próbatetek savkezelés után (saját fénykép)

5.3.2. Hajlító- és nyomószilárdsági vizsgálat

A habarcs hajlító- és nyomószilárdság vizsgálatához 40x40x160 mm-es próbatesteket készítettünk amelyeket kontrolált hőmérséklet és páratartalom mellett tároltunk klímaszobában majd dinamikus hatás nélkül, hardmadpontos terheléssel törtük el. A vizsgálatot az MSZ EN

12390-5:2009 (Magyar Szabványügyi Testület, 2009b) szabvány szerint végeztük. A terhelést egyenletesen 0,05 kN/s-os növekedéssel adagoltuk amíg a próbatest tönkre nem ment. Ezt követően a félbetört próbatestek ép végein a nyomószilárdságot is vizsgáltuk (a 5.3.1. fejezetben említett módon). A próbatesteket 7, 28, 56, 91, 182 napos korokban vizsgáltuk.



Kép 5.3-3: Hajlítószilárdság mérése (saját fénykép)



Kép 5.3-4: Nyomószilárdság mérése fél próbatesten (saját fénykép)

5.3.3. Kapilláris vízfelszívás

A kapilláris vízfelszívást a hajlítószilárdság méréséhez is használt 40x40x160 mm-es próbatesteken végeztük melyekből keverékenként 3-at használtunk fel (6db fél próbatest). Miután eltörtük a próbatesteket azokat a tört felületükkel lefelé 5 ± 2 mm mély vízbe helyeztük, ahol 36 óráig voltak. Ezután kivettük őket és megmértük a tömegüket, amit összehasonlítottunk

a vizsgálat előtt lemért száraz tömegükkel. Ebből számítottuk a vízfelszívási együttható értékét a következő módon:

$$W_{w,36} = \frac{\Delta m_{36}}{\sqrt{36}}$$

ahol: $W_{w,36}$ a 36 órához tartozó vízfelvételi együttható (kg/m²·h^{0,5})

Δm_{36} pedig a felületre vonatkoztatott tömegváltozás 36 órát követően (kg/m²)



Kép 5.3-5: Kapilláris vízfelvétel mérése (saját fénykép)

5.3.4. Teljes elmerítéses vízfelvétel

Az elmerítéses vízfelvételt 40x40x160 mm-es próbatesteken végeztük, keverékenként 3-3 darabon. A vizsgálat előtt lemértük a próbatestek száraz tömegét majd azokat vízbe merítettük. A próbatestek tömegét rendszeresen mértük, amíg azok nem állandósultak.



Kép 5.3-6: Teljes elmerítéses vízfelvétel (saját fénykép)

5.3.5. Kloridion migrációs vizsgálat

A kloridmigrációs vizsgálatot a Nordtest NT Build 492 (Nordtest, 1999) szabvány alapján végeztük. Az eljárás során egyenárammal idézzük elő a kloridionok elmozdulását. A vizsgálatokhoz Ø100/200-as hengereket készítettünk, ezekből levágtunk két, Ø100/50-es próbatestet. A vizsgálat előtt vákuum exszikkátorral légtelenítettük a korongokat. A próbatesteket ezután gumigyűrűkbe helyeztük, majd a szabvány szerint NaCl oldatba merítettük, felülről pedig 400 ml NaOH oldatot töltöttünk a gumihengerekbe. A mérés során alkalmazott egyenfeszültséget és a mérés időtartamát a kezdeti 30V feszültség alapján létrejövő áramerősség alapján határoztuk meg. A kloridbehatolást kolorimetriással mutattuk ki. A migrációs vizsgálat elvégzése után a korongokat felületükre merőlegesen elhasítottuk, és a hasított felületet kezeltük ezüst-nitrát oldattal. A lezajló reakció eredményeként ezüst-klorid keletkezik, ami fehér csapadékként kiválva jól megmutatja a behatolás határát. Ezt 10 mm-ként lemértük, majd az eredmények számtani közepét számítva határoztuk meg a behatolást. A behatolásból számoltuk a behatolási tényezőt.



Kép 5.3-7: A kloridion migrációs vizsgálathoz használt eszköz (saját fénykép)

5.3.6. Pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelések

A látható fény hullámhosszának felénél kisebb részleteket optikai mikroszkópokkal nem észlelhetjük. Ezek megfigyelésére egy lehetséges megoldás elektronmikroszkóp használata. Az elektronmikroszkóp vákuumban gyorsított elektronokat használ „megvilágításként” és mivel az elektronsugár hullámhossza nagyságrendekkel kisebb, mint a látható fényé, jelentősen kisebb méretű objektumok is megfigyelhetők vele. Megfigyelhetők például cement alapú anyagokban a pórusok, azok méretei, eloszlása, mikrorepedések, különböző ásványok fejlődése, átalakulása. Ezen kívül az elektronmikroszkópok általában rendelkeznek elemanalizátorral (EDS: Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy azaz

energiadiszperzív Röntgen spektroszkópia) amely lehetővé teszi a minta egy részének elemi összetételének meghatározását, amely összetétel segítségével például azonosíthatók a cementmátrixban kialakult kristályok. Ezek alapján lehetőségünk van a különböző savak korróziós hatásait figyelemmel kísérni (Kopecskó és Balázs, 2019) A TDK dolgozatban megtalálható elektronmikroszkópos felvételek PHENOM XL pásztázó elektronmikroszkóppal készültek.

5.3.7. Higanypenetrációs porozimetria

A higanypenetrációs poroziméter széles pórusméret tartomány vizsgálatára alkalmas módszer (3,5 nm – 950 µm) és a mérés eredményeiből számítható többek között a minta fajlagos felülete, jellemző pórusátmérője, porozitása stb. A fajlagos felület rendkívül fontos, mivel ez jellemezi a reakcióképes felületet, így nagy hatással van a porózus anyagok környezeti hatások z anyag savállóságára. A mérés alapja, hogy a nemnedvesítő folyadék (jelen esetben higany) a felületi feszültsége miatt a szilárd anyagoknak csak azon a pórusaiba tud behatolni, ahol a felületi feszültség miatt fellépő erőt a külső nyomást kompenzálni tudja. Ha feltételezzük, hogy a pórusok kör keresztmetszetűek, a sugaruk r , és p a külső nyomás, akkor a nem nedvesítő folyadékot $r2\pi p$ nyomóerő préseli a pórusokba. A nyomóerővel szemben ható erő a higany nedvesítési szögétől (α) és felületi feszültségtől (σ) függ:

$$r = \frac{-2 \cdot \sigma \cdot \cos\alpha}{p}$$

ahol:

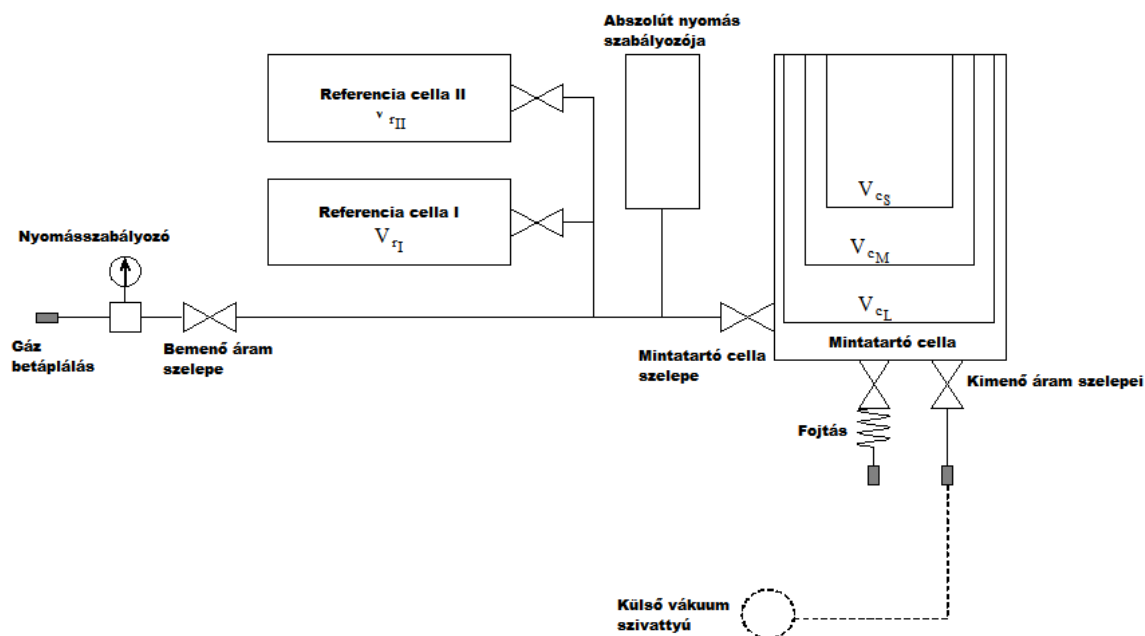
r	-	pórusátmérő
σ	-	a higany felületi feszültsége (0.484 N/m)
α	-	nedvesítési szög (140 °)
p	-	nyomás

Ez a Washburn egyenlet, amely szerint a nem-nedvesítő folyadék nedvesítési szögének, felületi feszültségének és a külső nyomás ismeretében meghatározhatjuk a pórus sugarát, feltételezve, hogy a pórus henger alakú. Nem-nedvesítő folyadékként leggyakrabban higanyt alkalmaznak, mivel a legtöbb anyagot nem nedvesíti (nedvesítési szög 110-150°). Mivel a nedvesítési szög értéke szűk tartományban változik, és nehezen mérhető, általában minden anyagnál 140°-ot feltételezünk a mérés kiértékelésekor. A higany határfelületi feszültsége függ a hőmérséklettől és a szennyeződéstől, de ezt mindig 0.484 N/m-nek vesszük.

A vizsgálati eredmények az NVKP_16-19_2016 sz. kutatási projekt keretében, a BME megbízásából a SZIKKTI Labor Kft. készítette.

5.3.8. Héliumpiknométeres anyagsűrűség meghatározás

A sűrűséget Quantachrome gyártmányú PENTAPYC hélium-piknométerrel mértük. A készülék elvi felépítése a 22. ábrán található.



Ábra 5.3-1: A héliumpiknométeres vizsgálat eszközének sematikus ábrája (az ábrát a SZIKKTI Labor Kft. küldte)

A készülék ismert minőségi jellemzőkkel rendelkező mérőgáz (hélium) segítségével nyomásméréseket és térfogatszámításokat végez, és a kapott értékekből megadott paraméterek és a bemért mintatömeg alapján számolja a sűrűséget.

A vizsgálati eredmények az NVKP_16-19_2016 sz. kutatási projekt keretében, a BME megbízásából a SZIKKTI Labor Kft. készítette.



Kép 5.3-8: A héliumpiknométeres sűrűségmérő készülék (a képet a SZIKKTI Labor Kft. küldte)

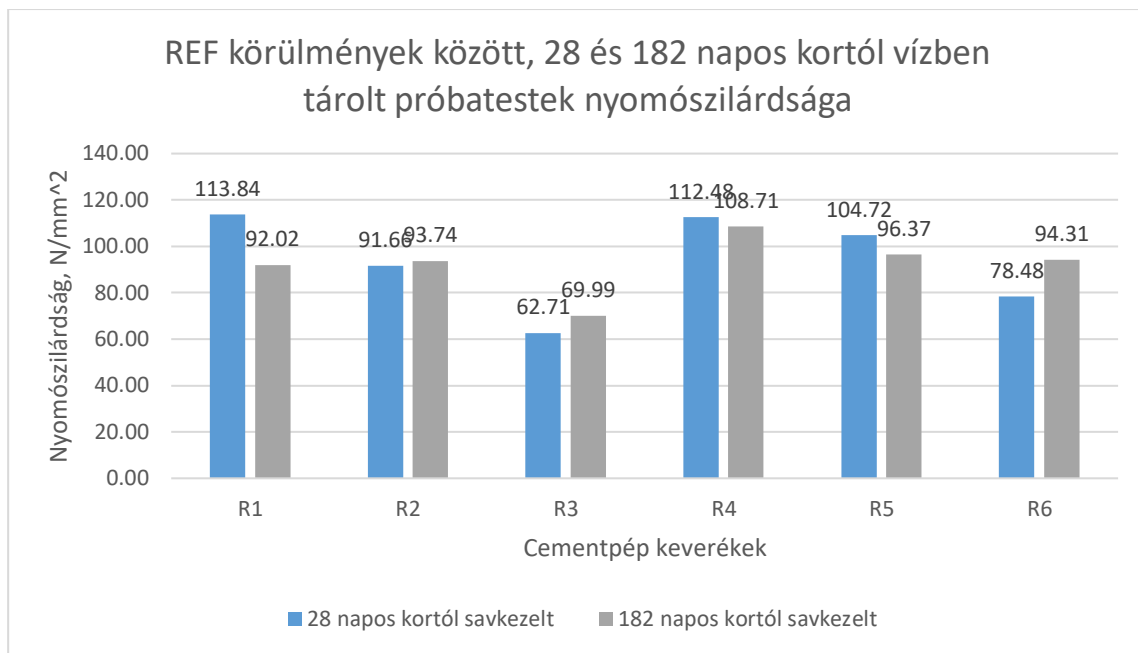
6. Eredmények és értékelésük

6.1. Cementpépek savkorróziós vizsgálata

A savkorróziós vizsgálatok eredményei alább láthatóak diagrammokon ahol egyszerre ábráztuk a próbatestek vizsgálat előtti és utáni testsűrűségét valamint külön tengelyen a nyomószilárdságaikat. Az adatok savkezelési csoportonként vannak feltüntetve, egy savkezelési csoport az ugyanazzal a savval, azonos körülmények közt (abrázio) lettek terhelve. Minden savkezelési csoport 5 próbatestet tartalmazott, amelyek vizsgálati eredményeinek számtani közepei láthatóak. Az egyes mintacsoport jelölések jelentései alább olvashatók. Ezen kívül másik táblázaton szerepelnek a savkezelt próbatestek nyomószilárdságai a hozzájuk tartozó referencia értékekkel arányosítva. (6.1-1 – 6.1-13 ábrák)

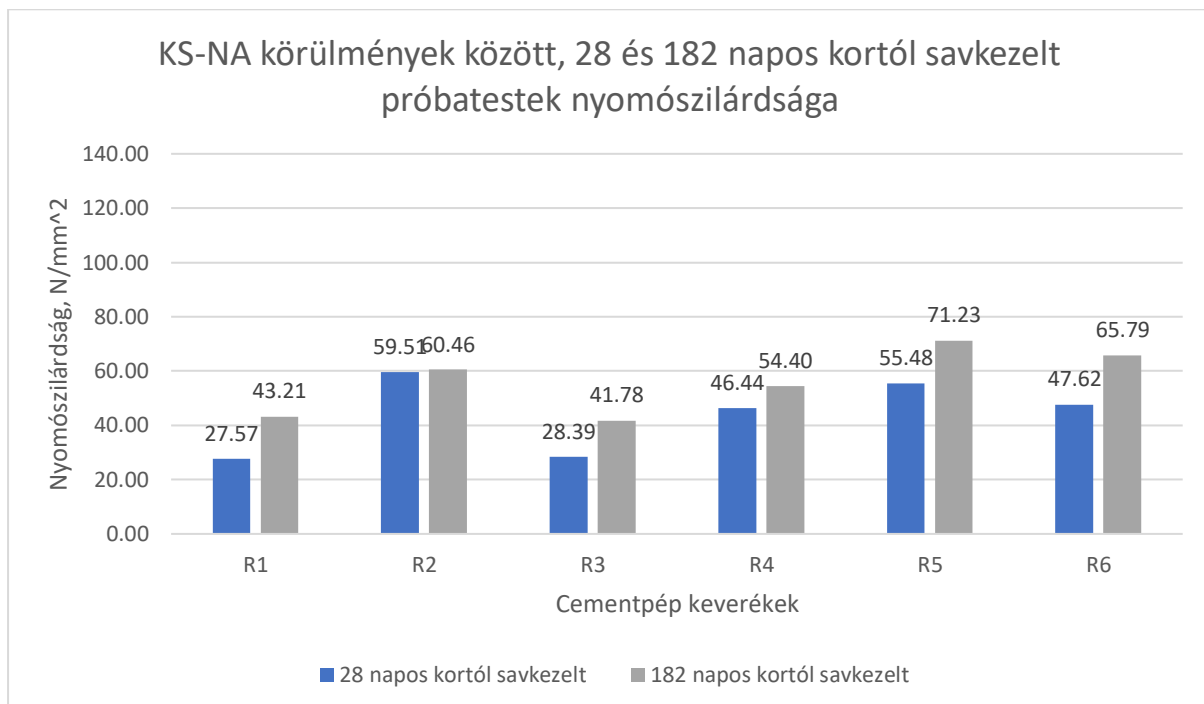
- REF: Referencia (a savkezeléssel azonos időtartamig vízben tárolva)
- KS-NA: Kénsavval kezelt - nem abrázio
- KS-A: Kénsavval kezelt - abrázio
- ES-NA: Ecetsavval kezelt - nem abrázio
- ES-A: Ecetsavval kezelt - abrázio
- TS-NA: Tejsavval kezelt - nem abrázio
- TS-A: Tejsavval kezelt – abrázio

A 8 hétig vízben tárolt keverékek esetében a 28 napos korban vízbe helyezettek esetében a hidratációt fokozta a vizes tárolás, míg a 182 napos korban vízbe helyezettek esetében ez már a hidratációra nem hatott olyan erőteljesen, a szilárdság nem növekedett már jelentősen. Ezen túlmenően a korábban keletkezett portlandit kioldódása a porozitás növekedésével járhat, ami a szilárdságot gyengíti (6.1-1 ábra).

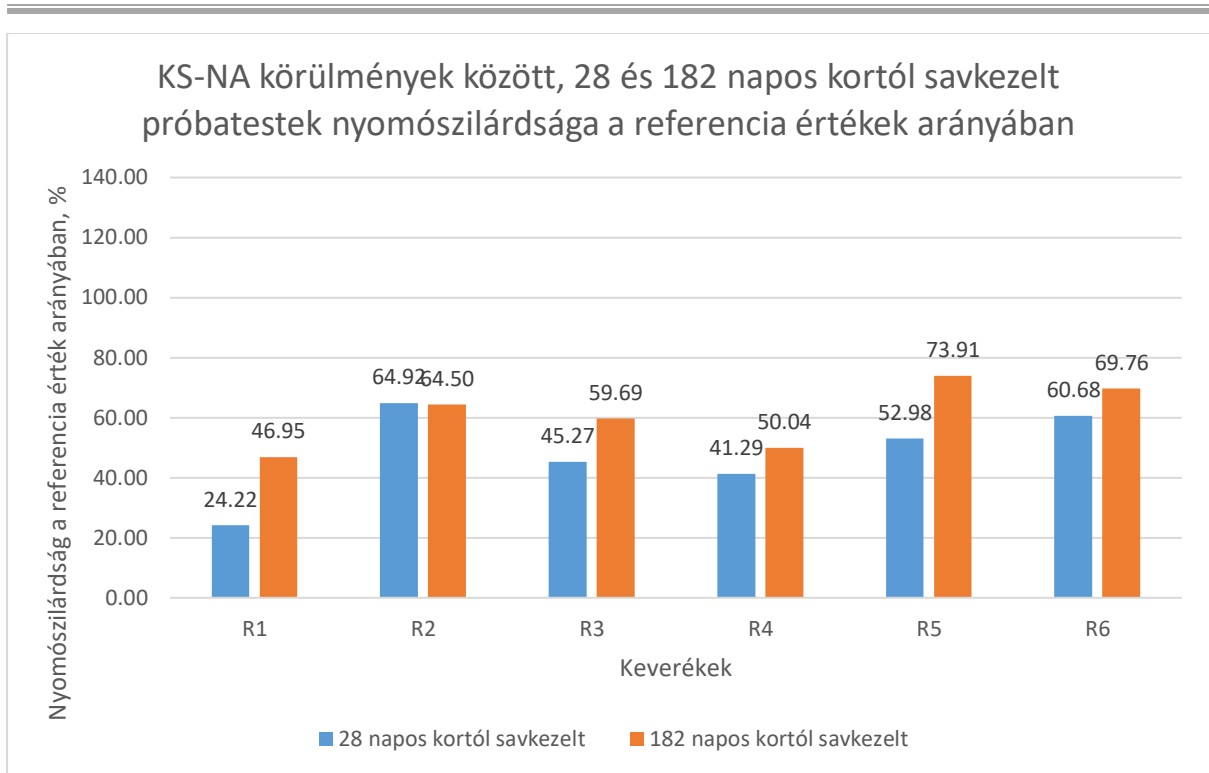


Ábra 6.1-2: REF körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága

A kénsavas, nem abrazív kezelés láthatóan nagyobb mértékben károsította a 28 napos korban savas körülmények közé került próbatesteket. A mindkét kezelési korban az R2, a később kezdődő kezelés esetében az R5 és R6 minták (laboratóriumi cementek) viselkedtek jobban. A legjobban az R5 viselkedett, a későbbi kezelés esetében (6.1-3 és 6.1-3 ábrák).

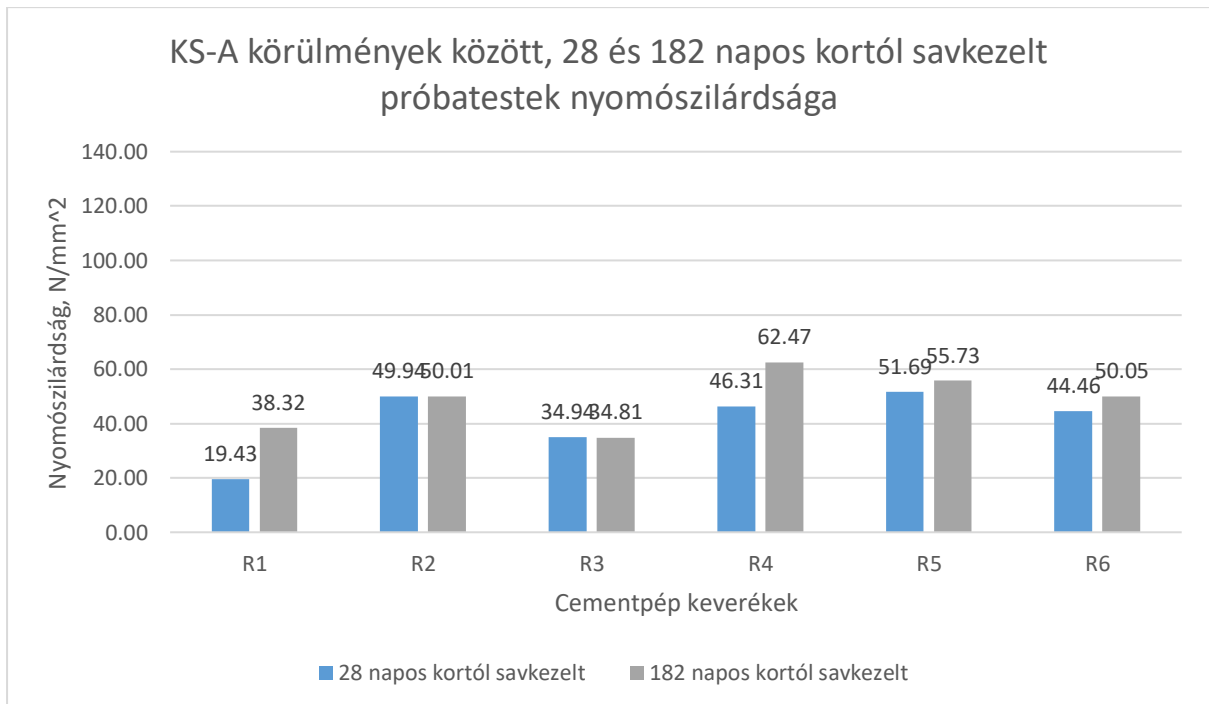


Ábra 6.1-4: KS-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága

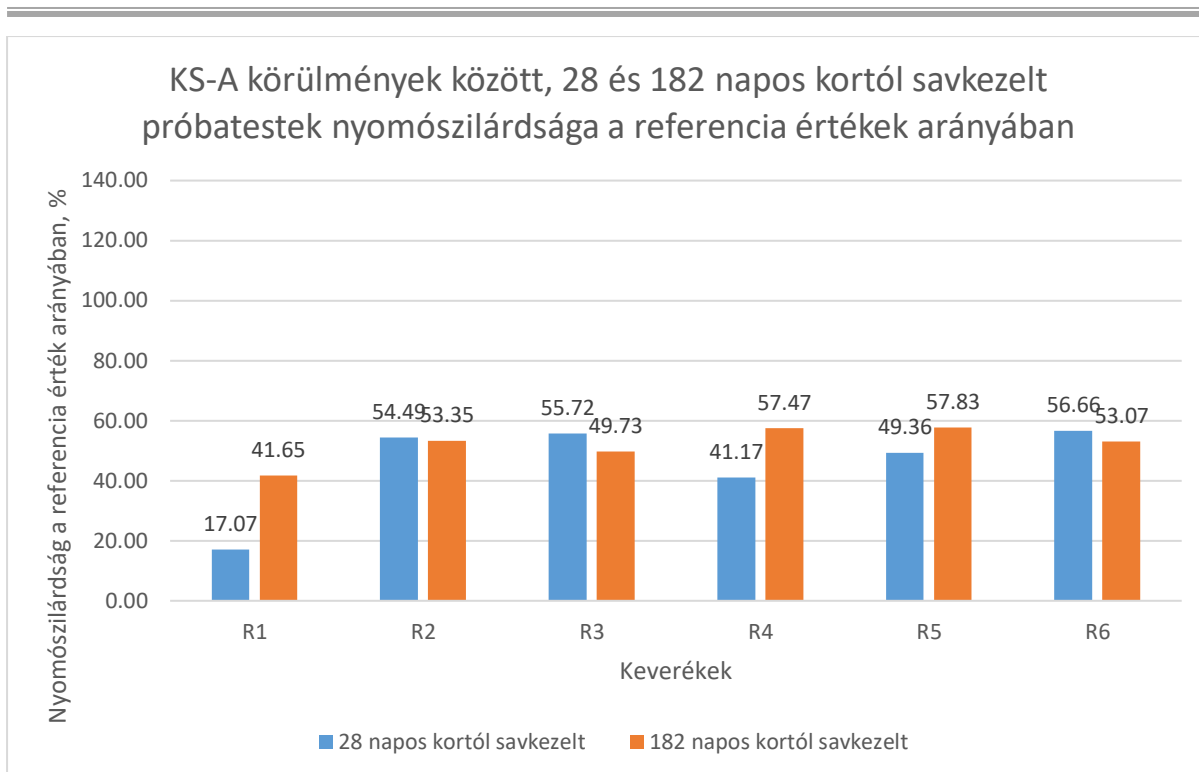


Ábra 6.1-5: KS-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában

A kénsavas, abrazív kezelés hatására a később (182 napos korban) kezdődő kezelés esetében az R4 és R5 minták (laboratóriumi cementek) viselkedtek jobban (6.1-4 és 6.1-6 ábrák). Az abrazív hatás a savas hatással együttesen jelentős mértékben csökkenti az összes minta szilárdságát, összehasonlítva a nem abrazívan kezelt mintákéval.

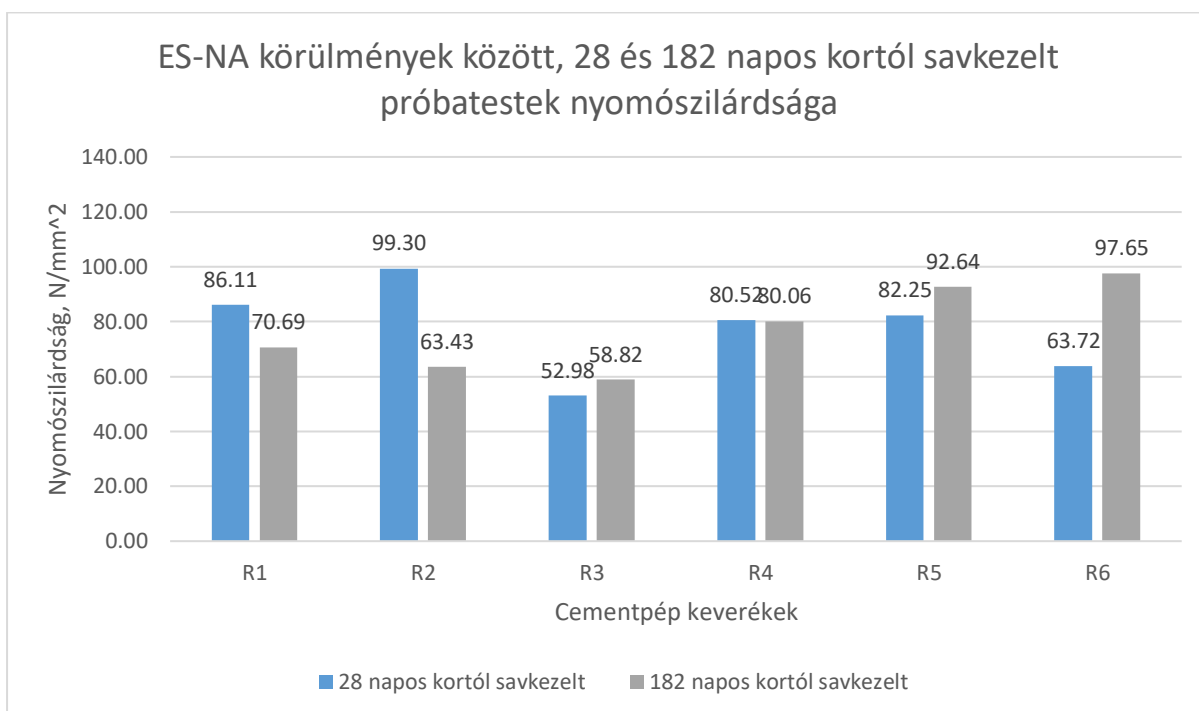


Ábra 6.1-7: KS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága

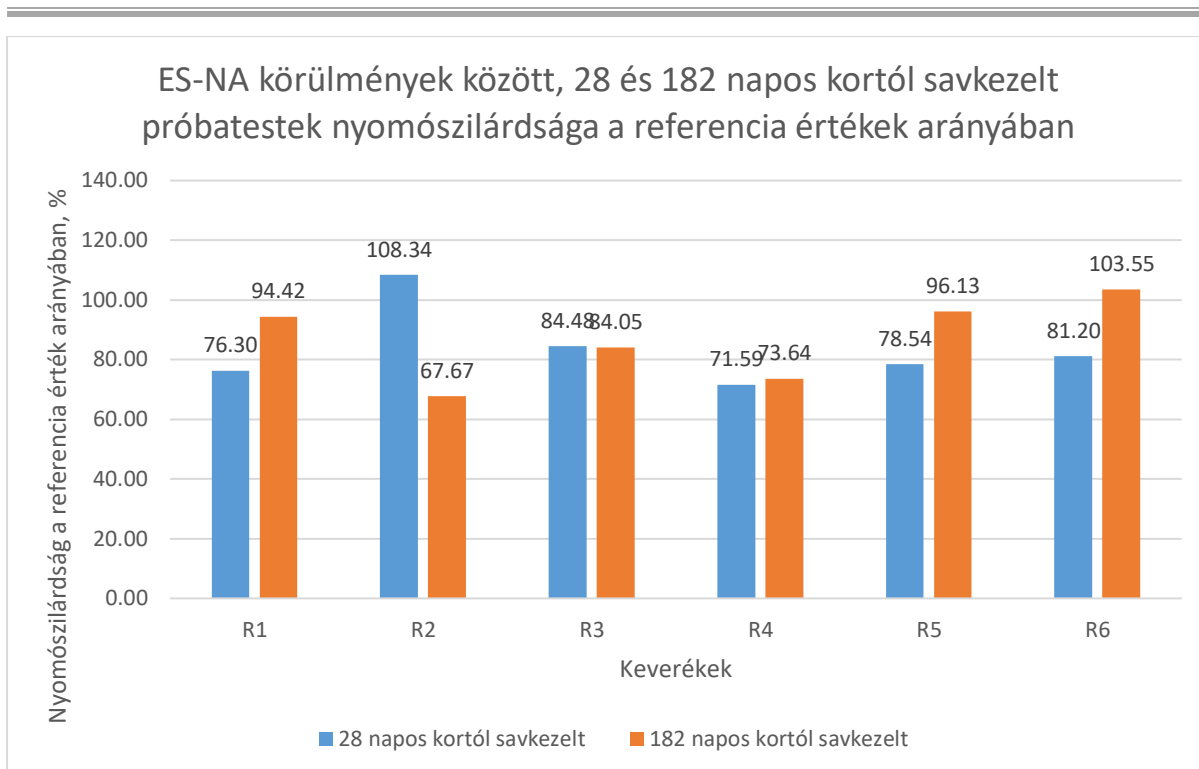


Ábra 6.1-8: KS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatestek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában

Az ecetsavas, nem abrazív kezelés hatására a korábban kezdődött savas kezelés esetében az R2, míg a később (182 napos korban) kezdődő kezelés esetében az R5 és R6 minták (laboratóriumi cementek) viselkedtek jobban (6.1-6 és 6.1-7 ábrák).

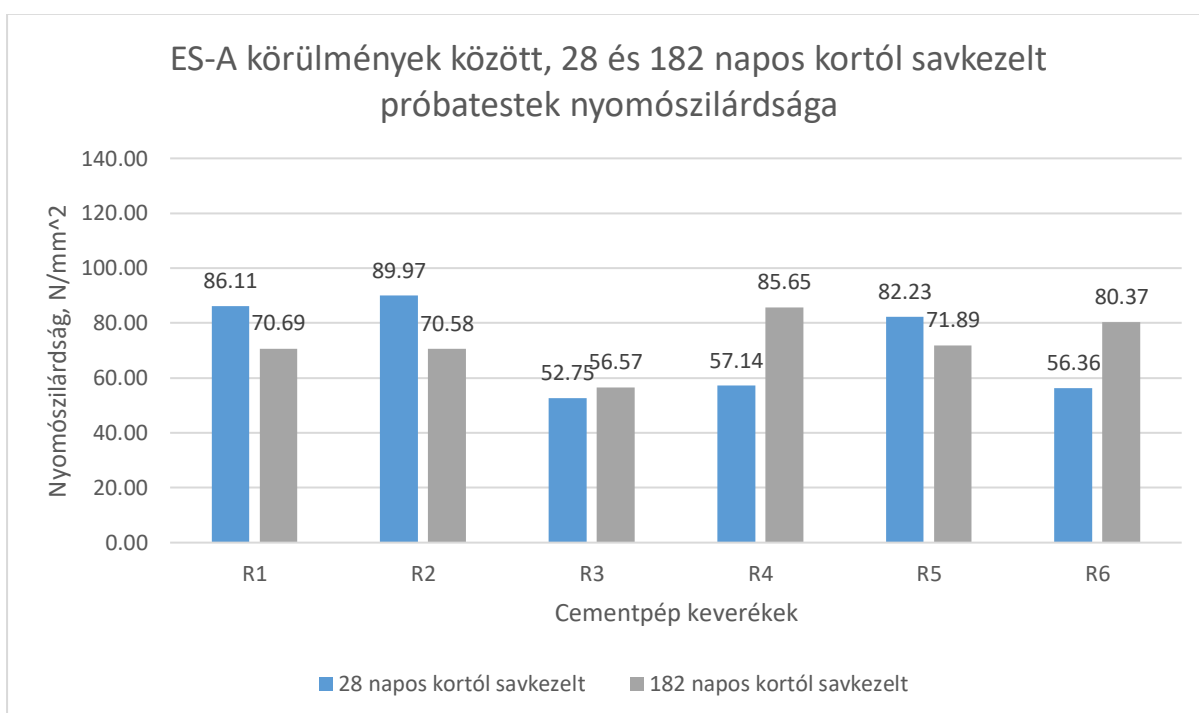


Ábra 6.1-9: ES-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatestek nyomószilárdsága

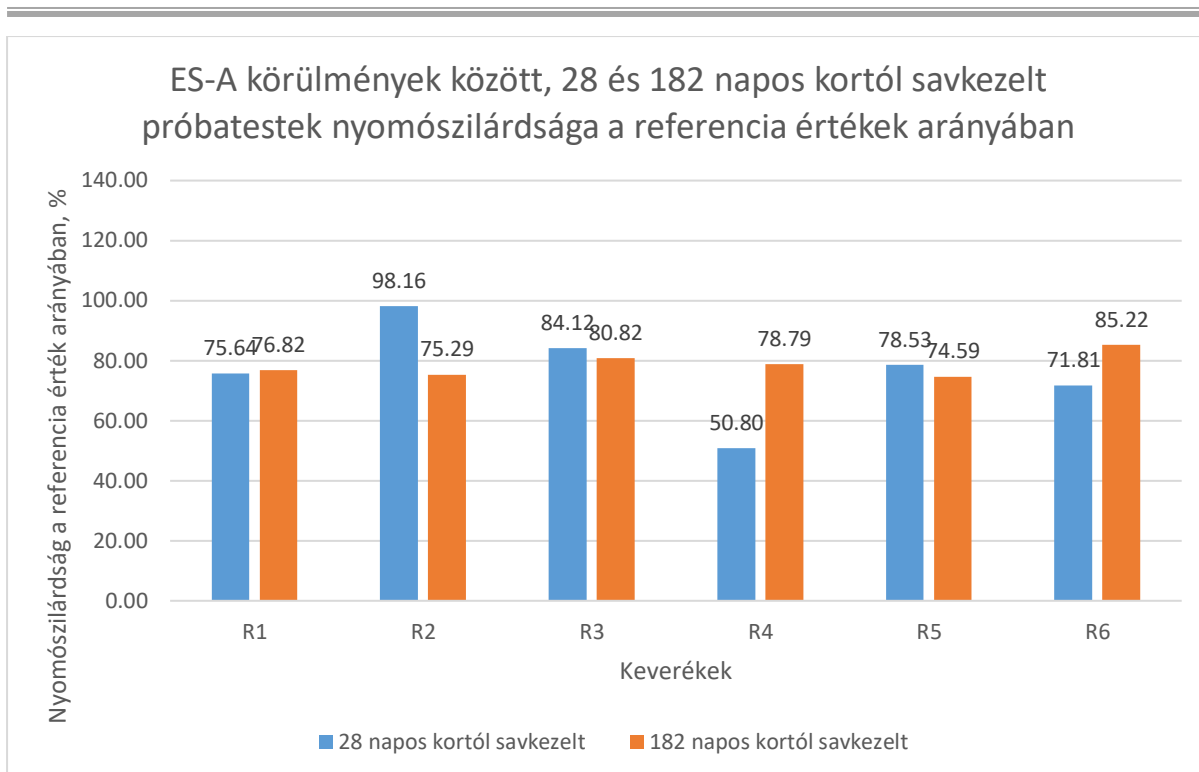


Ábra 6.1-10: ES-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelte próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában

Az ecetsavas, abráziv kezelés hatására a korábban kezdődött savas kezelés esetében az R2, míg a később (182 napos korban) kezdődő kezelés esetében az R5 minta (laboratóriumi cement) viselkedett jobban (6.1-8 és 6.1-9 ábrák). Az abráziv hatás a savas hatással együttesen nagyobb mértékben csökkenti az összes minta szilárdságát, összehasonlítva a nem abrázívan kezelt mintákkal.

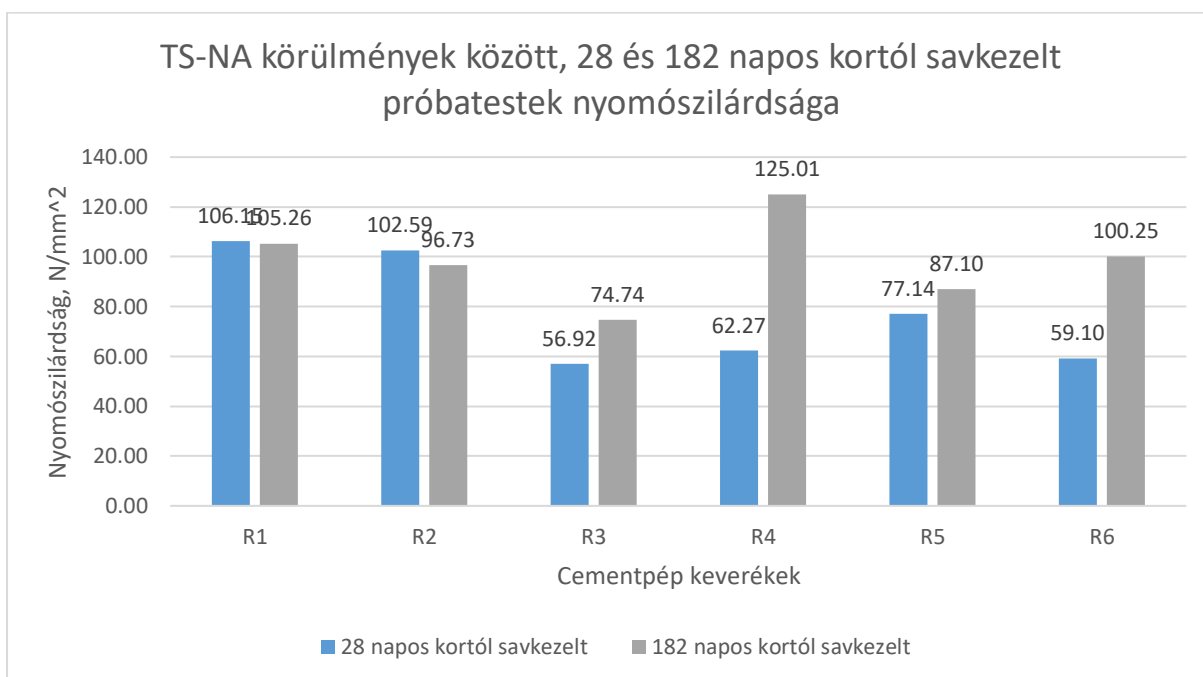


Ábra 6.1-11: ES-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelte próbatetek nyomószilárdsága

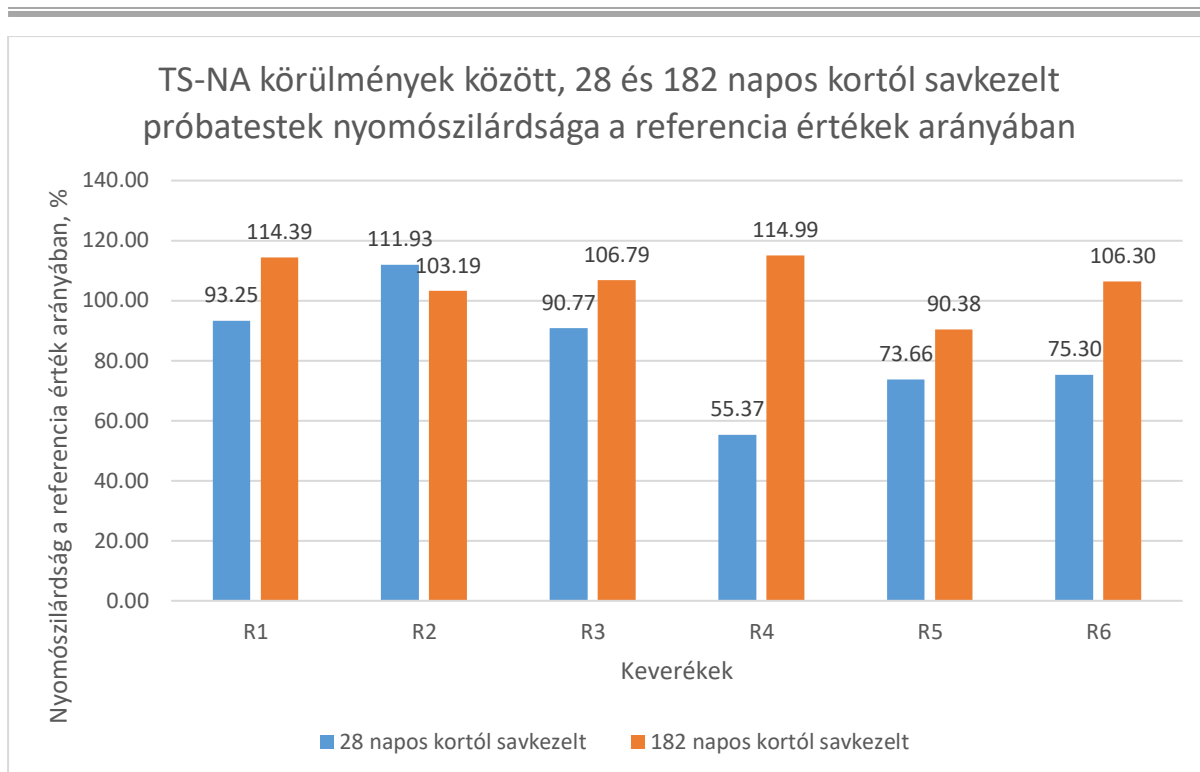


Ábra 6.1-12: ES-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatestek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában

A 28 napos korban kezdődő, nem abrázív tejsavas kezelés az R3 – R6 kohósalakos keverékek esetében jelentős mértékben csökkentette a szilárdságot, míg a későbbi korban ugyanezen minták esetében ez a szilárdság csökkentő hatás már nem érvényesült, helyette jelentős relatív szilárdság növekedés figyelhető meg. A legnagyobb mértékben az R4 szilárdsága nőtt. Ez valószínűleg a tejsav portlandittal történő reakciója során keletkező Ca-laktát pórusokban történő kicsapódásának köszönhető (6.1-10 és 6.1-11 ábrák).

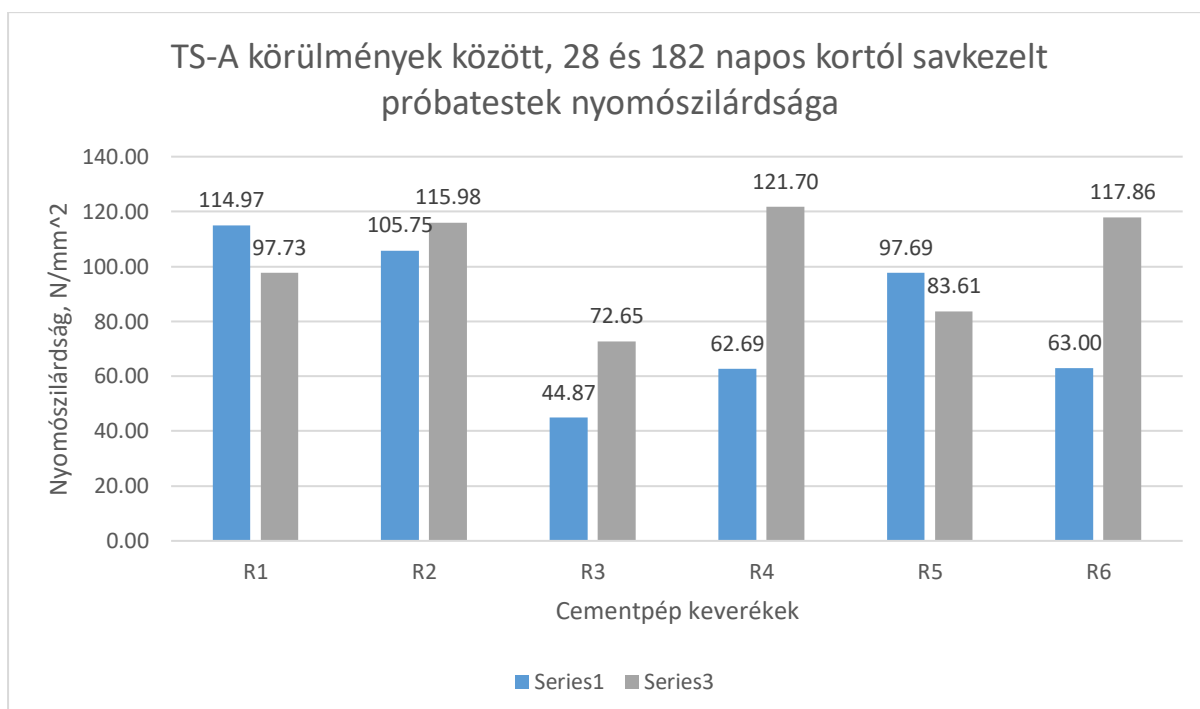


Ábra 6.1-13: ES-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatestek nyomószilárdsága

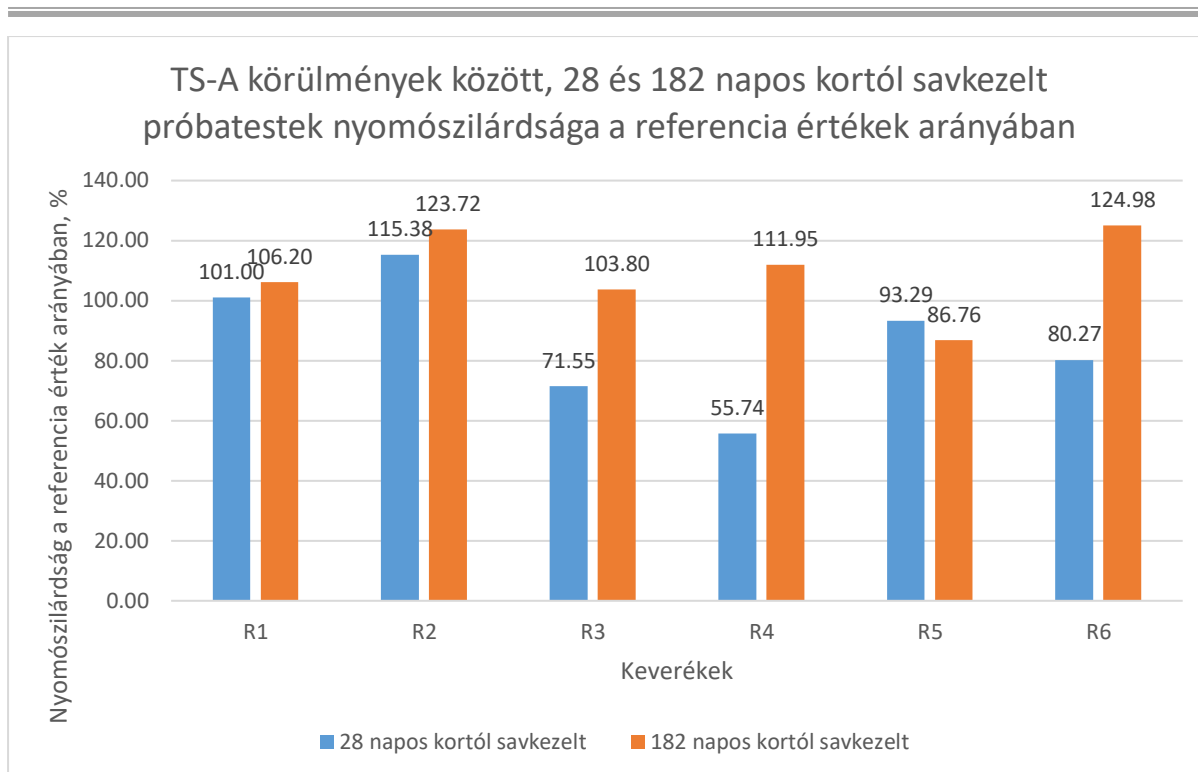


Ábra 6.1-14: TS-NA körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában

A későbbi korban kezdődő, abrázív tejsavas kezelés az R2 esetében kismértékben csökkentette a szilárdságot, míg a többi minta esetében a későbbi korban szilárdságnövekedés figyelhető meg. A legjelentősebb változás az R4 esetében figyelhető meg, és egyben ez mutatta a legjobb viselkedést is (6.1-12 és 6.1-13 ábrák).



Ábra 6.1-15: TS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatetek nyomószilárdsága

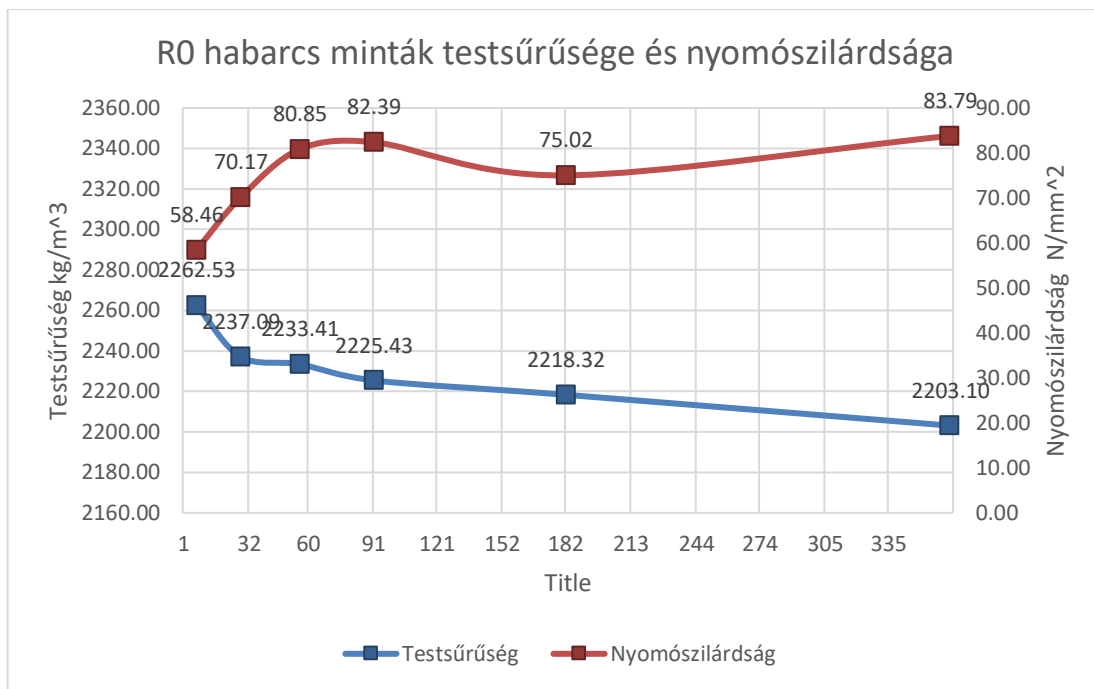


Ábra 6.1-16: TS-A körülmények között, 28 és 182 napos kortól savkezelt próbatestek nyomószilárdsága a referencia értékek arányában

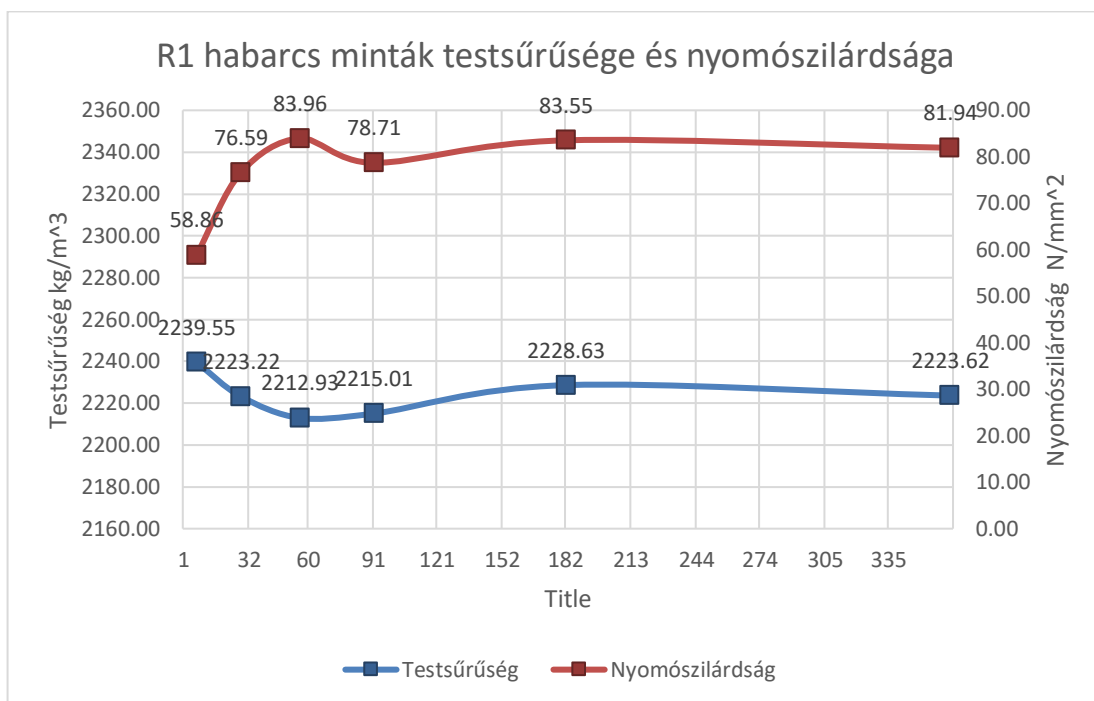
6.2. Habarcsek hajlító és nyomószilárdsága

Alább láthatók az egyes keverékekből készített hasábok hajlító és nyomószilárdságai valamint testsűrűségei. A diagrammok a szilárdságokat külön-külön tüntetik fel a testsűrűséggel, a vizsgált korokban. Minden mintából, ugyanabban a korban három próbatestet vizsgáltunk és az eredményeik számtani közepe látható a diagrammokon. (6.2-1 – 6.2-14 ábrák)

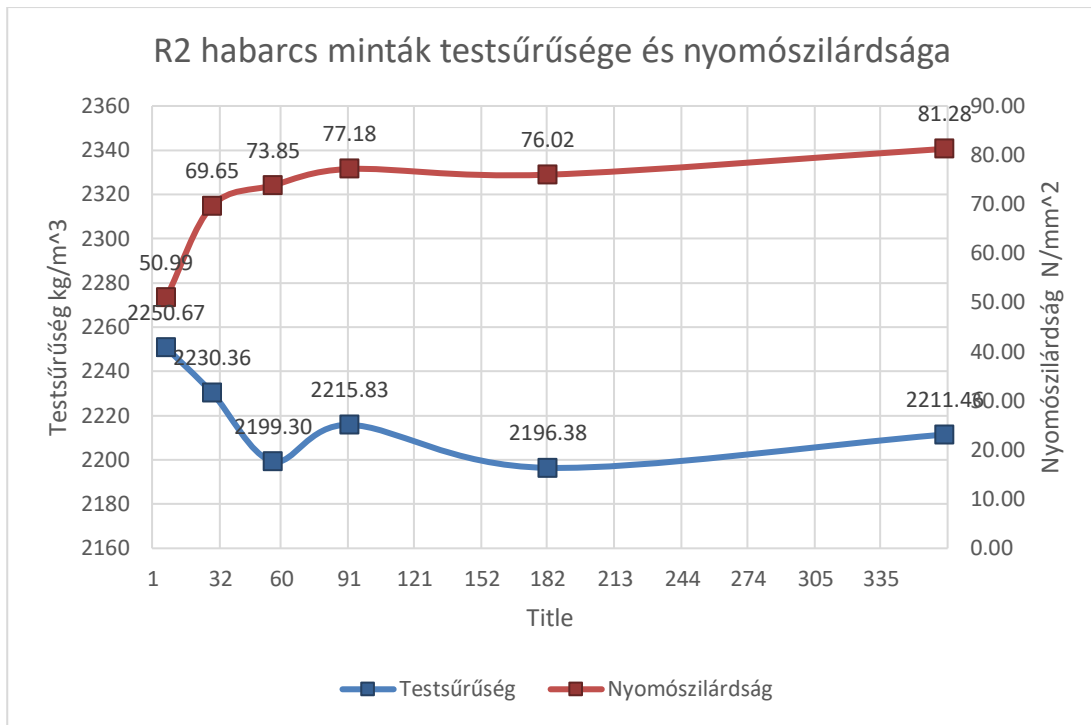
Az eredmények alapján jól látszik mely keverékek tartalmaztak gyorsan szilárduló cementeket. Ezek között szerepel az R5 jelű keverék, amely a magas korai szilárdsága mellett jó végső szilárdsági értékekkel is rendelkezett. Hasonlóan jó eredményeket kaptunk az R4-es keverék vizsgálatából, amely ugyan lassabb szilárdulást mutatott, de magasabb volt a végső szilárdsága.



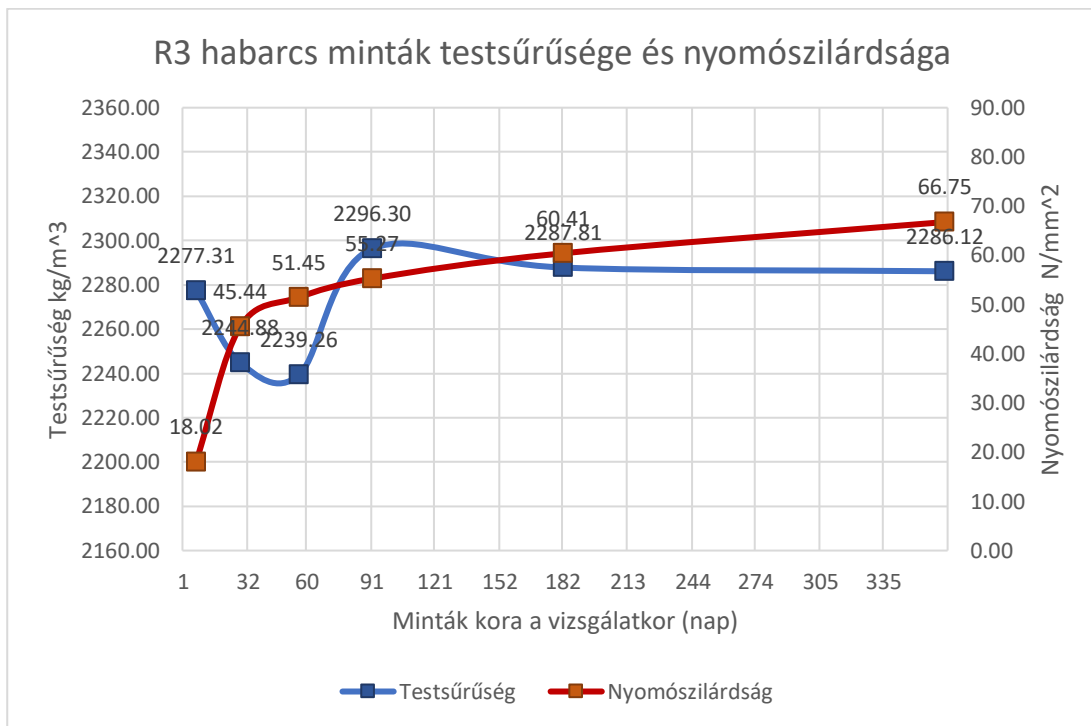
Ábra 6.2-1: R0 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága



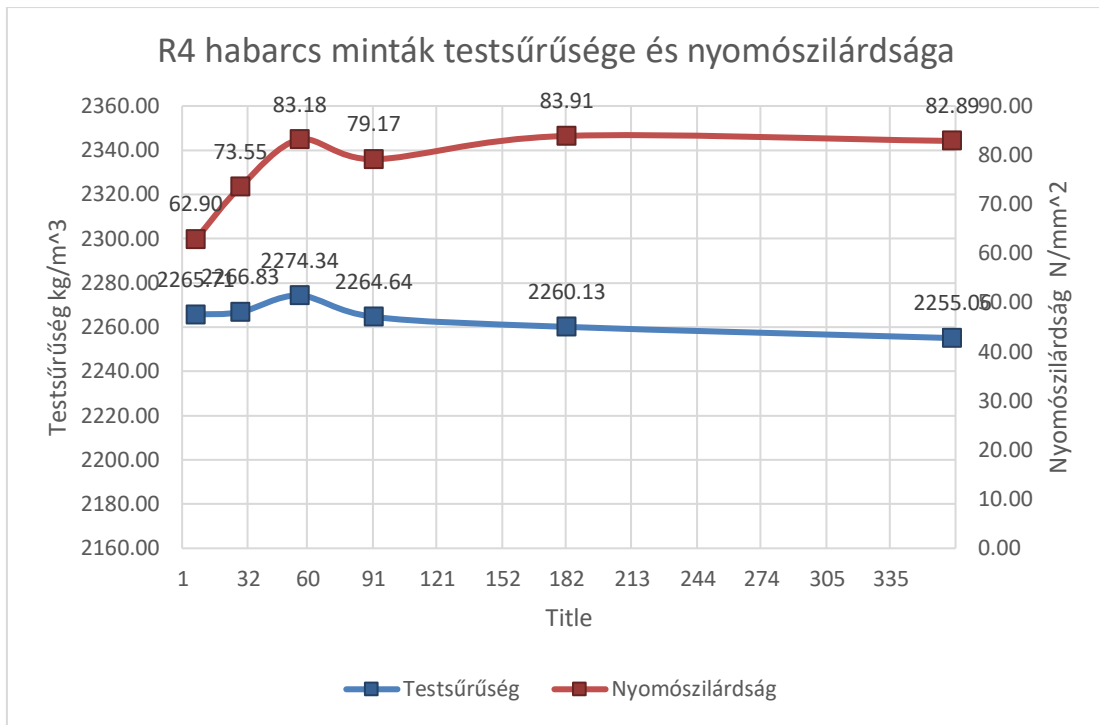
Ábra 6.2-2: R1 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága



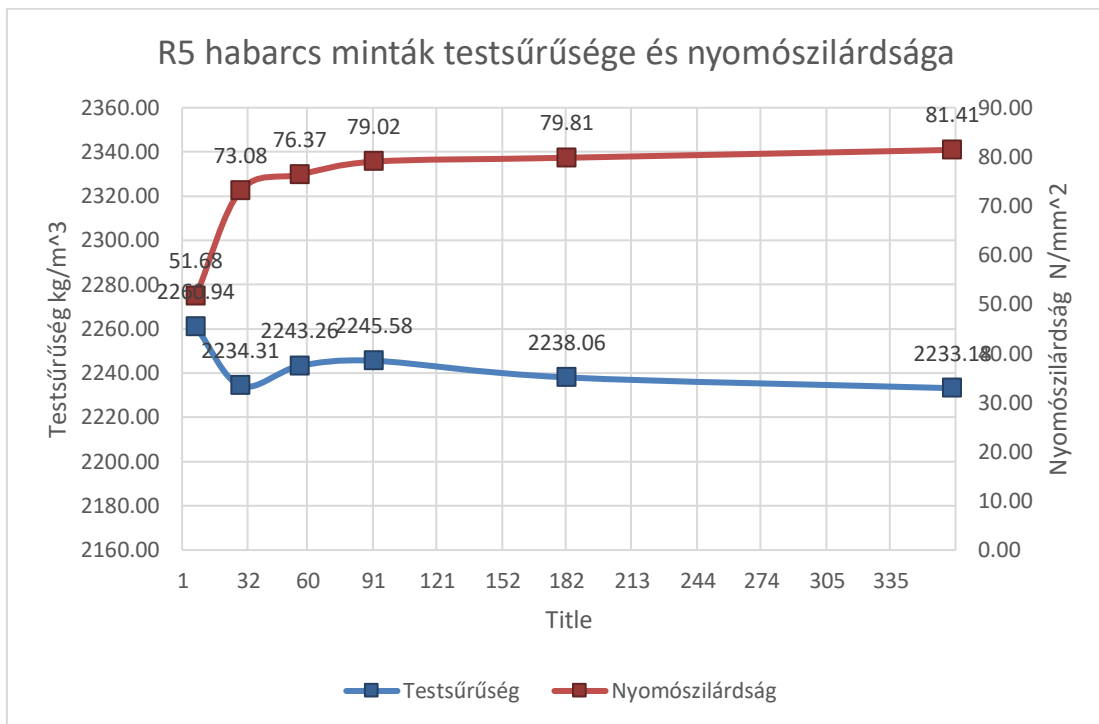
Ábra 6.2-3: R2 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága



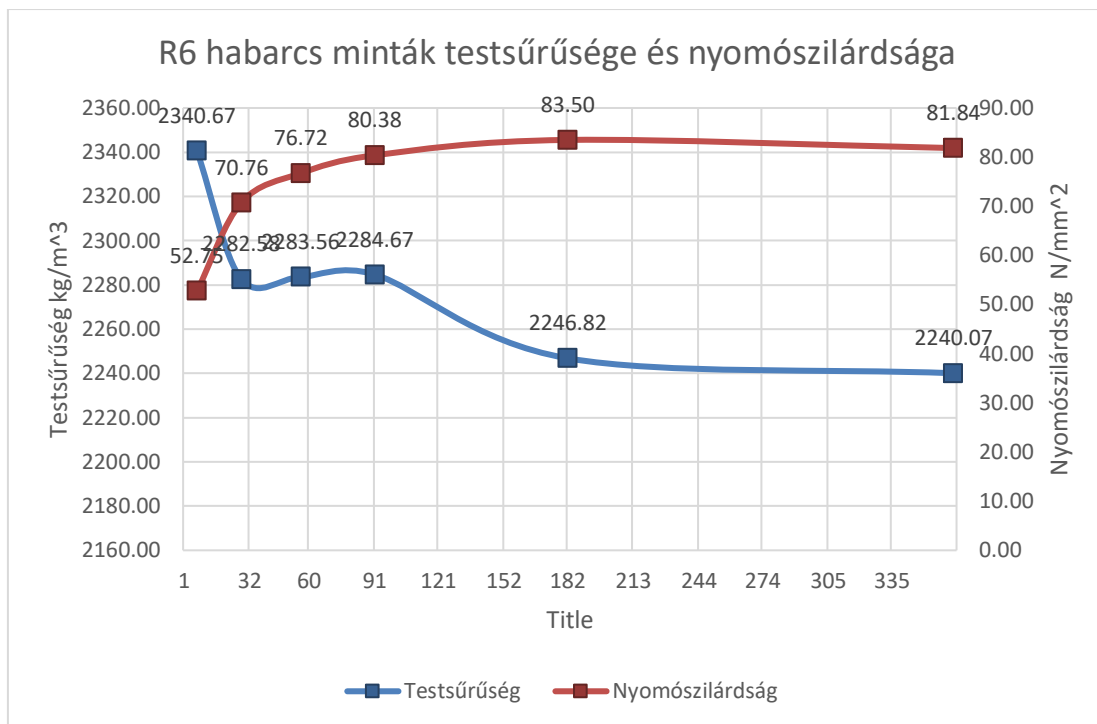
Ábra 6.2-4: R3 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága



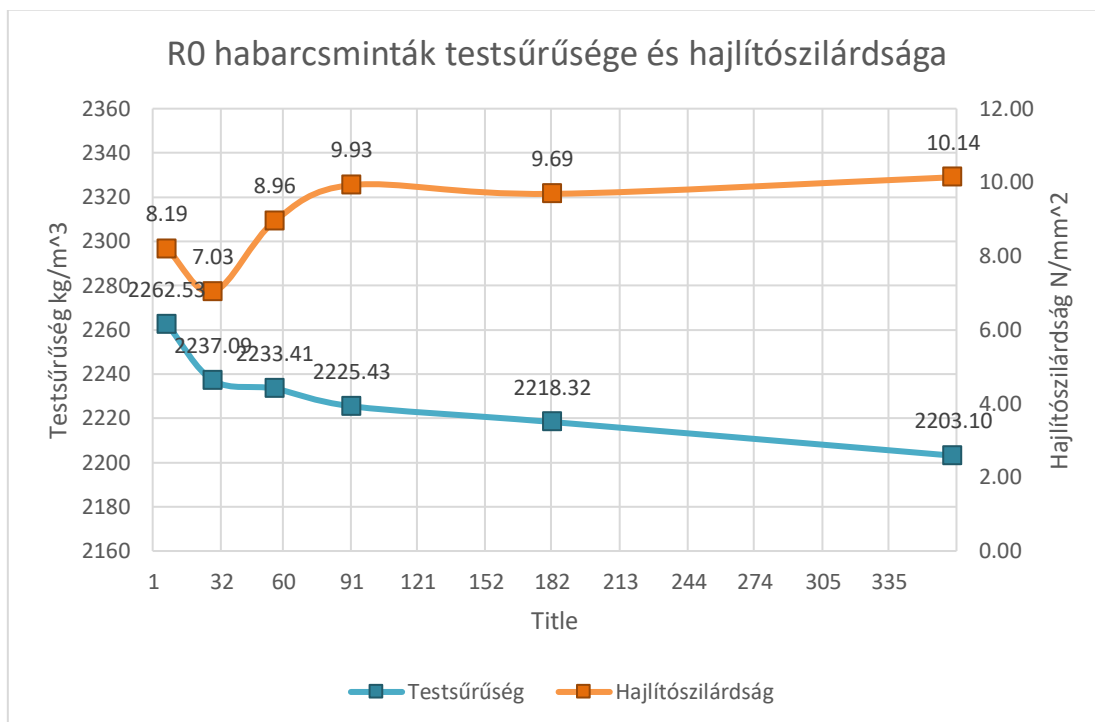
Ábra 6.2-5: R4 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága



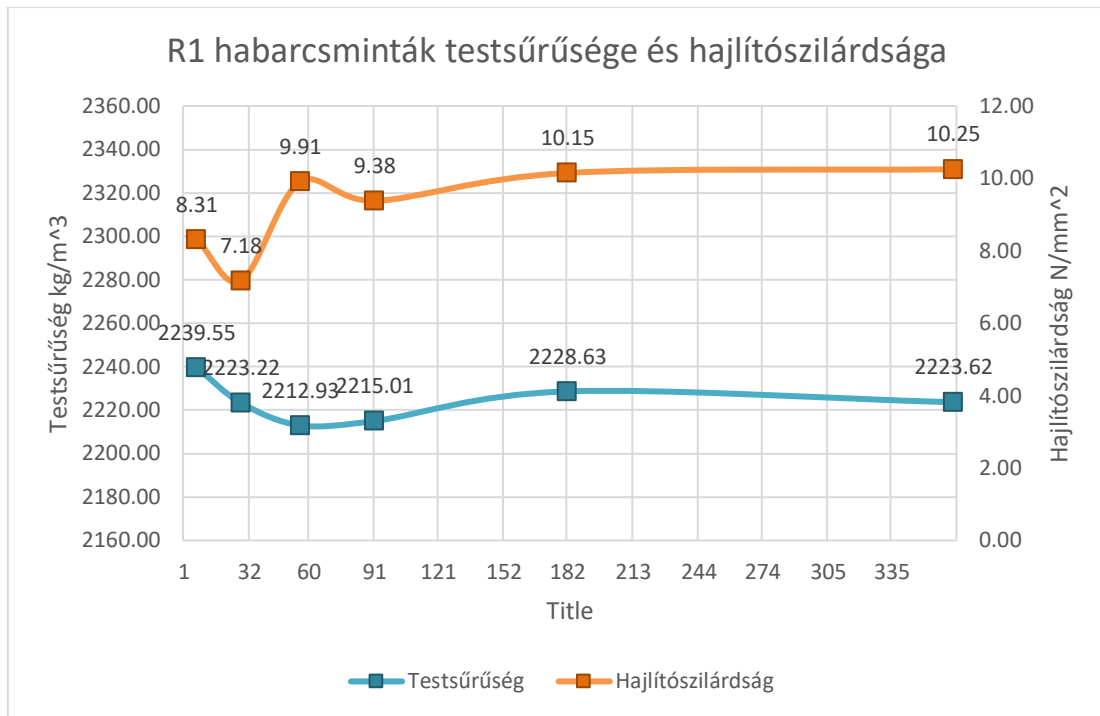
Ábra 6.2-6: R5 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága



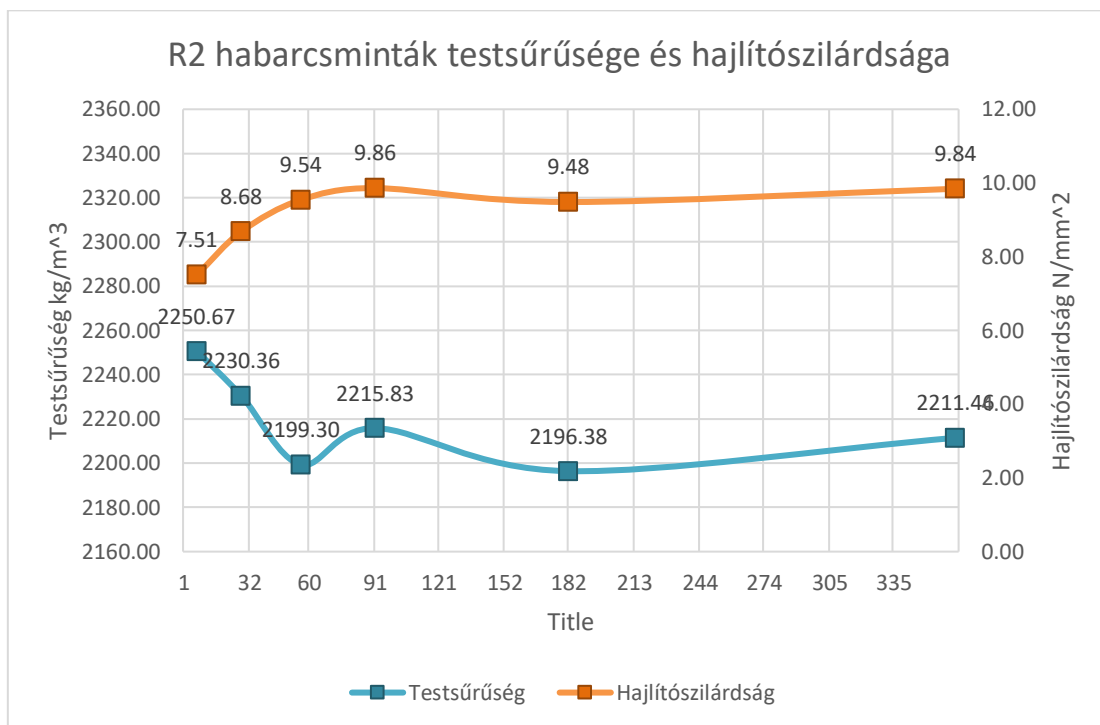
Ábra 6.2-7: R6 habarcs minták testsűrűsége és nyomószilárdsága



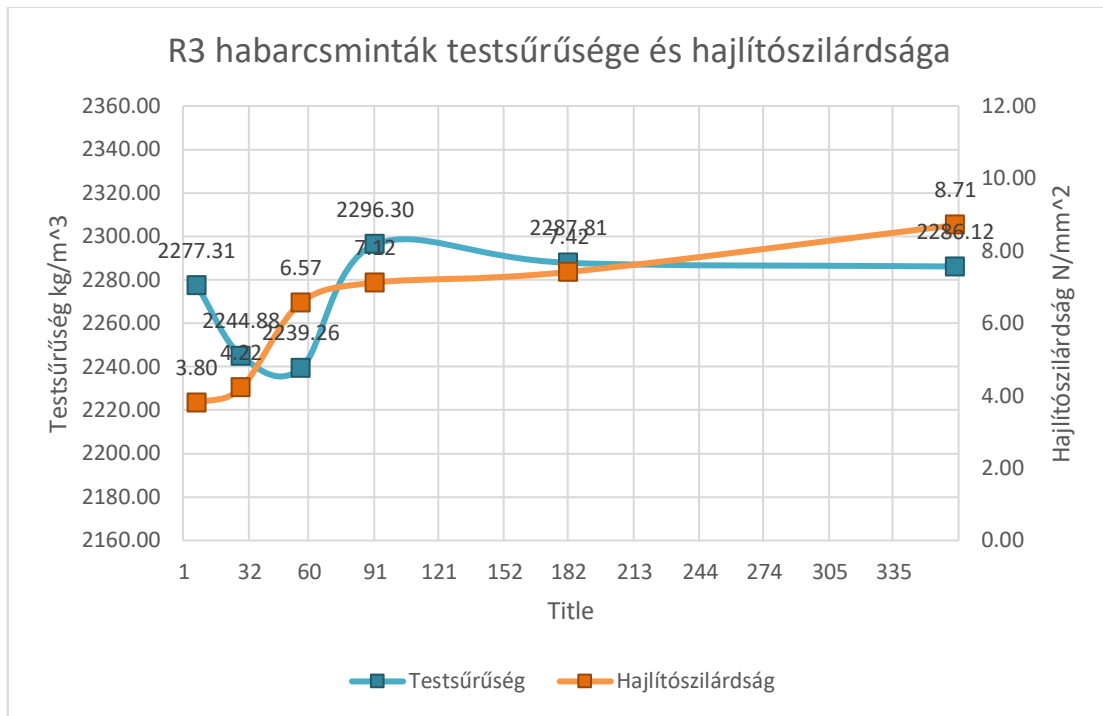
Ábra 6.2-8: R0 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága



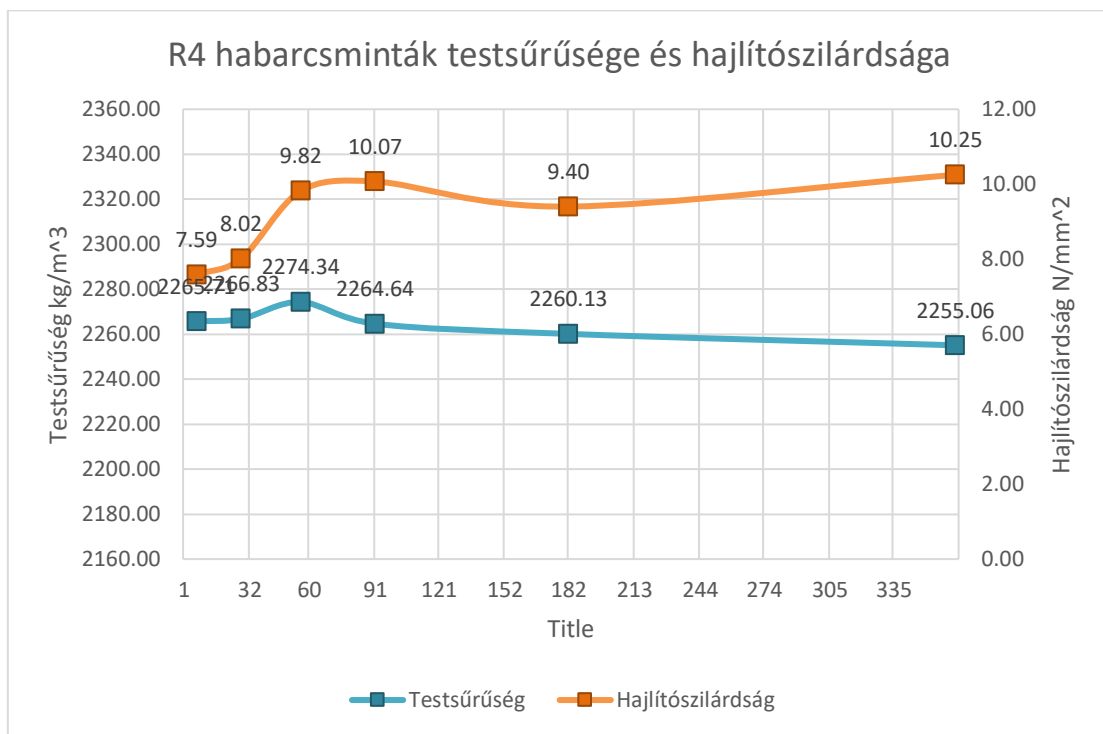
Ábra 6.2-9: R1 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága



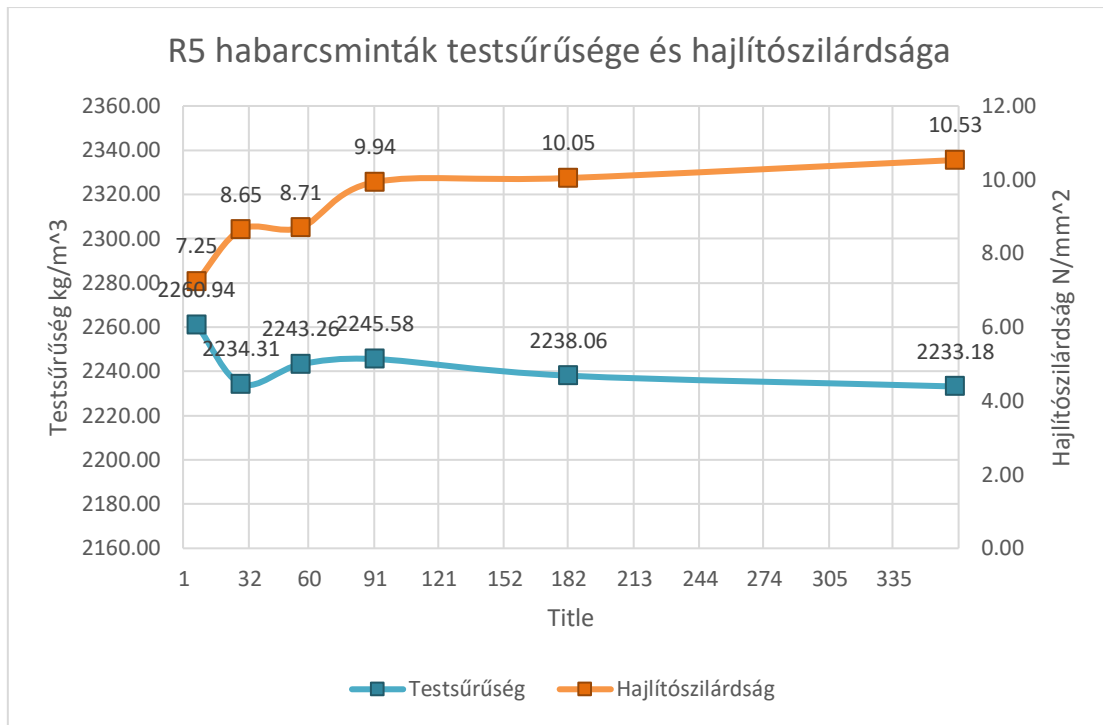
Ábra 6.2-10: R2 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága



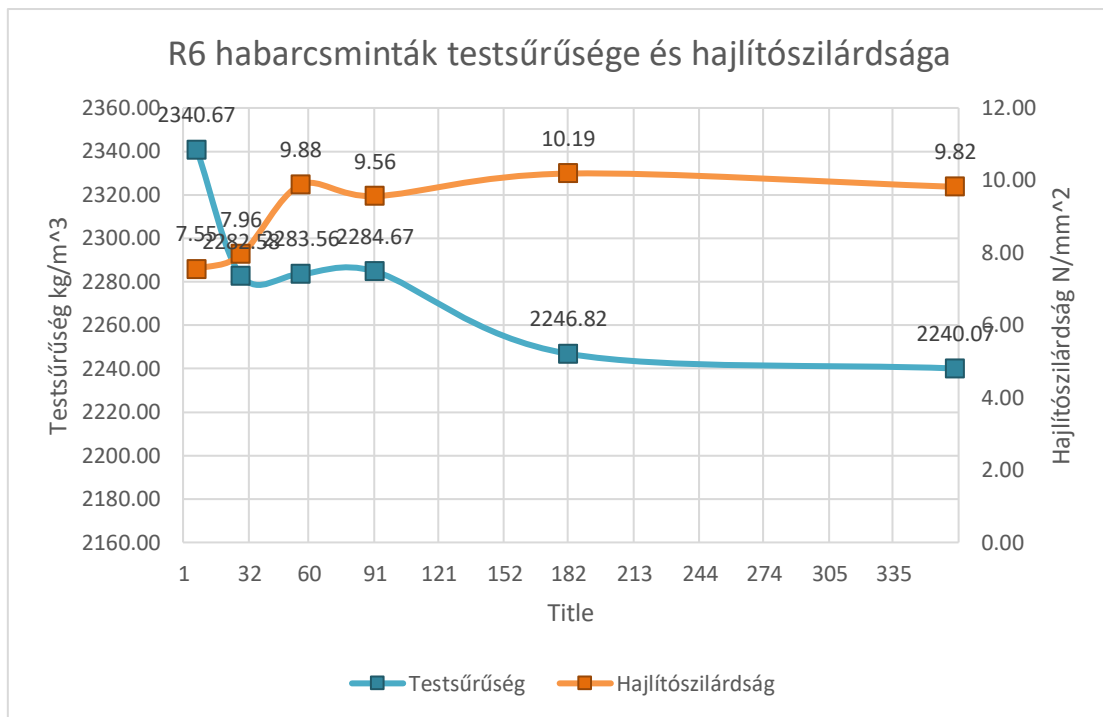
Ábra 6.2-11: R3 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága



Ábra 6.2-12: R4 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága



Ábra 6.2-13: R5 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága



Ábra 6.2-14: R6 habarcsminták testsűrűsége és hajlítószilárdsága

6.3. Higanypenetrációs porozimetria

Alább láthatóak a higanypenetrációs porozimetria vizsgálat eredményei táblázatos formában. A táblázatok tartalmazzák a jellemző pórustartományt, amelybe a minta pórusainak

nagy része esik, a leggyakoribb pórusátmérőt, ami a vizsgált pórusátmérő tartományok közül a legtöbbször fordult elő a mintában, a kumulatív pórusátmérőt, a mért porozitást térfogatszázalékban, valamint a minta fajlagos felületét. (6.3-1 – 6.3-6 táblázatok)

A higanypenetrációs porozimetria eredményein jól látszik az R3 keverék kiemelkedően magas porozitása és fajlagos felülete, amely adatok alapján a savkorróziós ellenállóképességét alacsonynak becsülnénk, de a valóságba a relatív nyomószilárdsági adatai nem ezt mutatják.

Keverék/ kor (nap)	Vizsgált jellemzők, MIP				
	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő	Kumulatív pórustérfoga cm ³ /g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület m ² /g
R0	205,3 μm – 3,6 nm	66,9 nm – 39,7 nm	0,1262	23,59	15,36
R1	191,9 μm – 3,6 nm	115,2 nm – 45,0 nm	0,0984	18,52	6,60
R2	190,5 μm – 3,6 nm	99,8 nm – 48,4 nm	0,1120	22,20	10,79
R3	205,3 μm – 3,6 nm	59,0 nm – 3,8 nm	0,2002	33,83	60,89
R4	205,3 μm – 3,6 nm	78,6 nm – 49,1 nm	0,1183	21,86	19,69
R5	187,3 μm – 3,6 nm	83,5 nm – 30,1 nm	0,1072	20,06	16,92
R6	187,2 μm – 3,6 nm	56,2 nm – 33,2 nm	0,1124	21,15	18,36

Táblázat 6.3-1: 28 napos cementpépek higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei

Keverék/ kor (nap)	Vizsgált jellemzők, MIP				
	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő	Kumulatív pórustérfogat m ³ /g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület m ² /g
R0	188,4 μm – 3,6 nm	64,7 nm – 34,8 nm	0,1194	22,20	16,20
R1	189,4 μm – 3,6 nm	103,2 nm – 62,6 nm	0,0923	17,15	10,99
R2	217,3 μm – 3,6 nm	97,5 nm – 65,3 nm	0,1094	21,07	8,99
R3	205,8 μm – 3,6 nm	62,5 nm – 3,6 nm	0,1934	32,97	69,7683
R4	202,5 μm – 3,6 nm	70,1 nm – 44,6 nm	0,1008	19,27	12,31

R5	206,2 μm – 3,6 nm	48,3 nm – 33,7 nm	0,0967	18,50	16,73
R6	206,1 μm – 3,6 nm	62,3 nm – 35,3 nm	0,1073	20,29	13,93

Táblázat 6.3-2: 56 napos cementpépek higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei

Keverék/ kor (nap)	Vizsgált jellemzők, MIP				
91 napos Cementpép	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő	Kumulatív pórustérfogat, cm^3/g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület m^2/g
R0	187,3 μm – 3,6 nm	66,5 nm – 36,5 nm	0,1127	21,07	14,63
R1 (= RE)	191,8 μm – 3,6 nm	73,6 nm – 53,2 nm	0,0883	16,58	7,88
R2	207,9 μm – 3,6 nm	70,8 nm – 43,0 nm	0,0996	19,10	14,88
R3	185,3 μm – 3,6 nm	58,3 nm – 3,6 nm	0,1883	32,42	70,82
R4	198,1 μm – 3,6 nm	70,9 nm – 44,7 nm	0,0942	18,06	7,32
R5	208,7 μm – 3,6 nm	53,4 nm – 32,6 nm	0,0945	18,01	16,25
R6	199,7 μm – 3,6 nm	59,8 nm – 35,6 nm	0,1026	19,60	16,26

Táblázat 6.3-3: 91 napos cementpépek higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei

Keverék/ kor (nap)	Vizsgált jellemzők, MIP				
28 napos Habarcs	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő	Kumulatív pórustérfogat, cm^3/g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület m^2/g
R0	191,9 μm – 3,6 nm	93,6 nm – 70,0 nm	0,0537	12,52	2,08
R1 (= RE)	193,5 μm – 3,6 nm	92,3 nm – 67,5 nm	0,0484	11,02	5,37
R2	193,2 μm – 3,6 nm	111,3 nm – 21,8 nm és 6,0 nm – 3,6 nm	0,0528	11,98	9,24
R3	205,3 μm – 3,6 nm	77,9 nm – 5,6 nm	0,0888	19,41	11,78

R4	186,7 µm – 3,6 nm	65,3 nm – 26,7 nm	0,0493	11,15	8,68
R5	187,3 µm – 3,6 nm	86,3 nm – 25,9 nm	0,0477	10,78	4,16
R6	187,2 µm – 3,6 nm	73,5 nm – 20,9 nm és 5,0 nm – 4,0 nm	0,0509	11,48	8,76

Táblázat 6.3-4: 28 napos habarcsok higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei

Keverék/ kor (nap)	Vizsgált jellemzők, MIP				
	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő	Kumulatív pórustérfogat cm ³ /g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület m ² /g
R0	-	-	-	-	-
R1	190,1 µm – 3,6 nm	68,2 nm – 50,3 nm	0,0456	10,61	4,81
R2	217,3 µm – 3,6 nm	70,0 nm – 40,4 nm	0,0487	10,90	3,38
R3	205,8 µm – 3,6 nm	55,4 nm – 3,6 nm	0,0684	15,02	19,40
R4	201,1 µm – 3,6 nm	75,2 nm – 6,0 nm	0,0461	10,64	7,90
R5	206,2 µm – 3,6 nm	71,5 nm – 29,5 nm és 11,7 nm – 4,6 nm	0,0439	10,49	9,64
R6	187,2 µm – 3,6 nm	82,4 nm – 20,1 nm	0,0491	10,98	6,49

Táblázat 6.3-5: 56 napos habarcsok higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei

Keverék/ kor (nap)	Vizsgált jellemzők, MIP				
	Jellemző pórusátmérő tartomány	Leggyakoribb pórusátmérő	Kumulatív pórustérfogat m ³ /g	Porozitás, V/V %	Fajlagos felület m ² /g
R0	191,8 µm – 3,6 nm	76,8 nm – 28,1 nm és 7,7 nm – 4,6 nm	0,0523	11,79	8,60

R1	207,9 μm – 3,6 nm	77,6 nm – 7,8 nm	0,0415	9,37	7,12
R2	184,4 μm – 3,6 nm	84,7 nm – 3,7 nm	0,0465	10,44	7,00
R3	184,4 μm – 3,6 nm	84,7 nm – 3,7 nm	0,0536	10,44	8,07
R4	198,1 μm – 3,6 nm	66,8 nm – 18,3 nm	0,0432	9,78	4,48
R5	199,1 μm – 3,6 nm	50,9 nm – 23,3 nm	0,0431	9,75	4,86
R6	199,7 μm – 3,6 nm	81,6 nm – 27,2 nm	0,0415	9,43	4,01

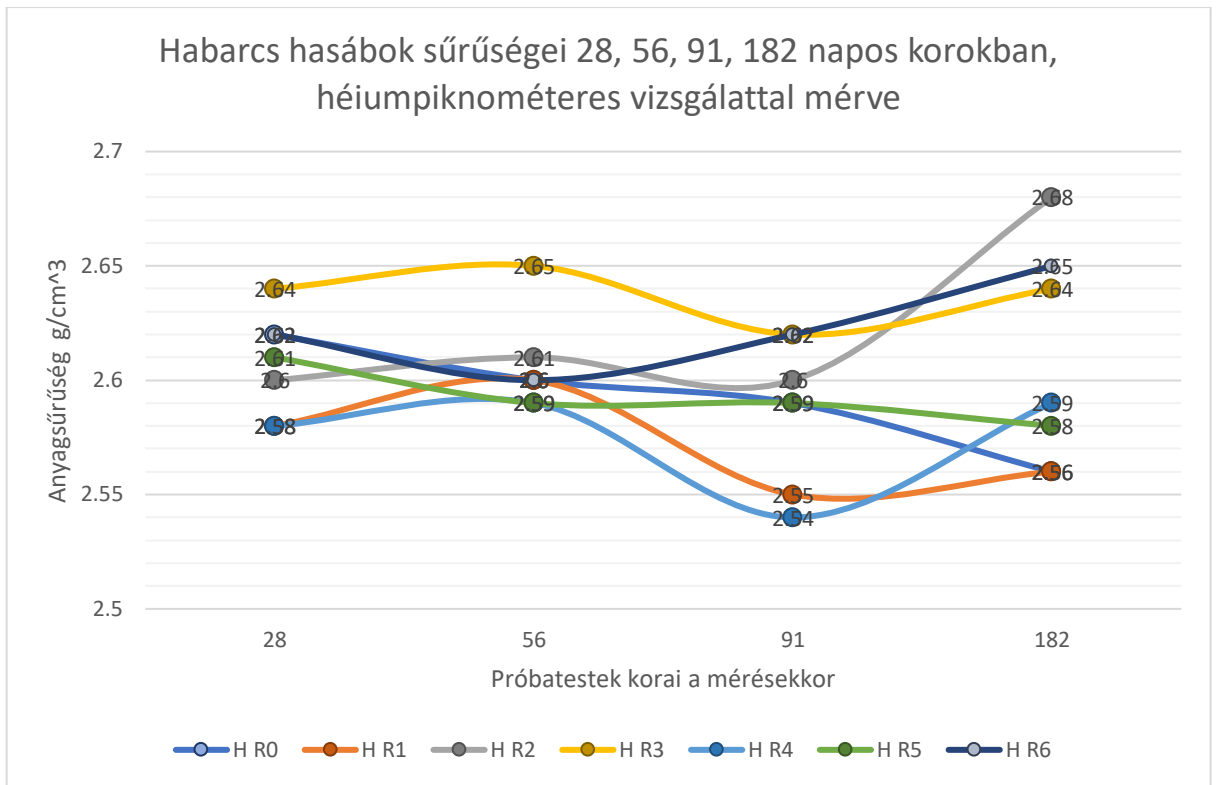
Táblázat 6.3-6: 182 napos habarcsok higanypenetrációs porozimetria vizsgálatának eredményei

6.4. Héliumpiknométeres sűrűségmérés

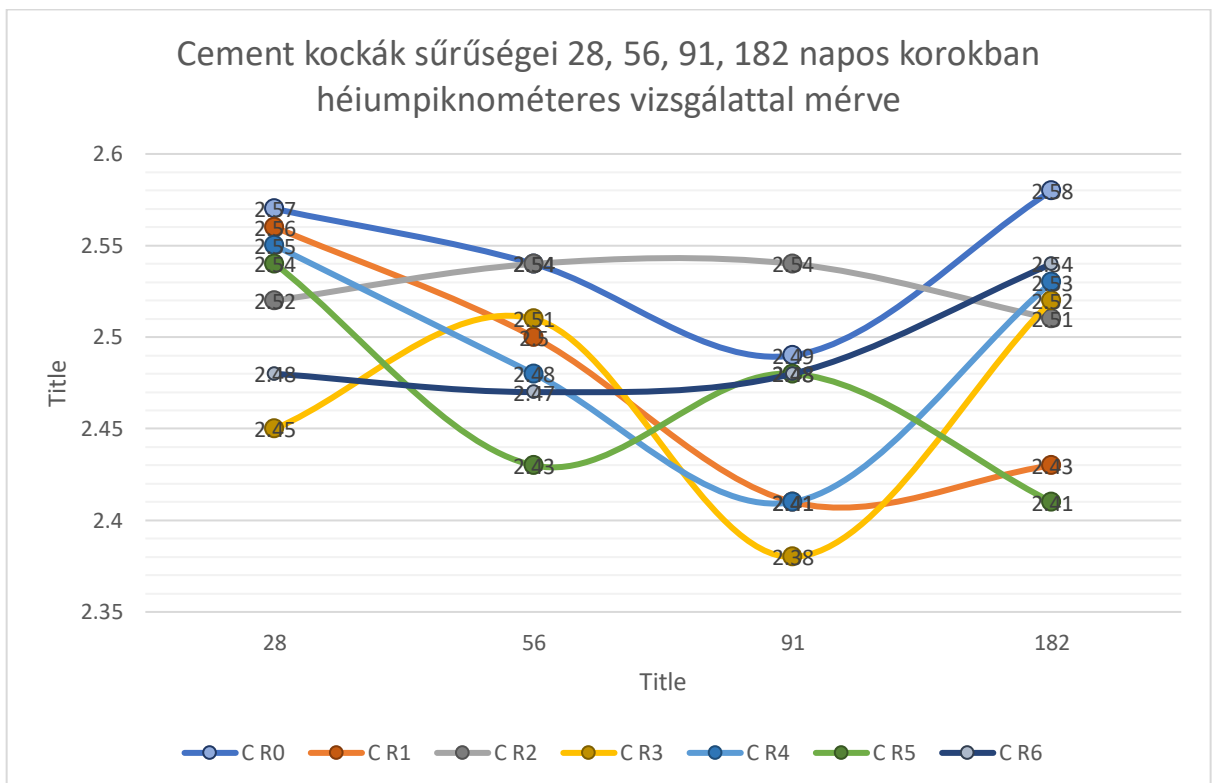
Alább láthatók a keverékek anyagsűrűségei 28, 56, 91 és 182 napos korokban diagrammokon ábrázolva. Külön szerepelnek a habarcsok és cementpépek sűrűségei keveréktípusonként. (6.4-1 és 6.4-2 ábrák)

A keverékek:

- H R0-6: Habarcs minták
- C R0-6: Cementpép minták



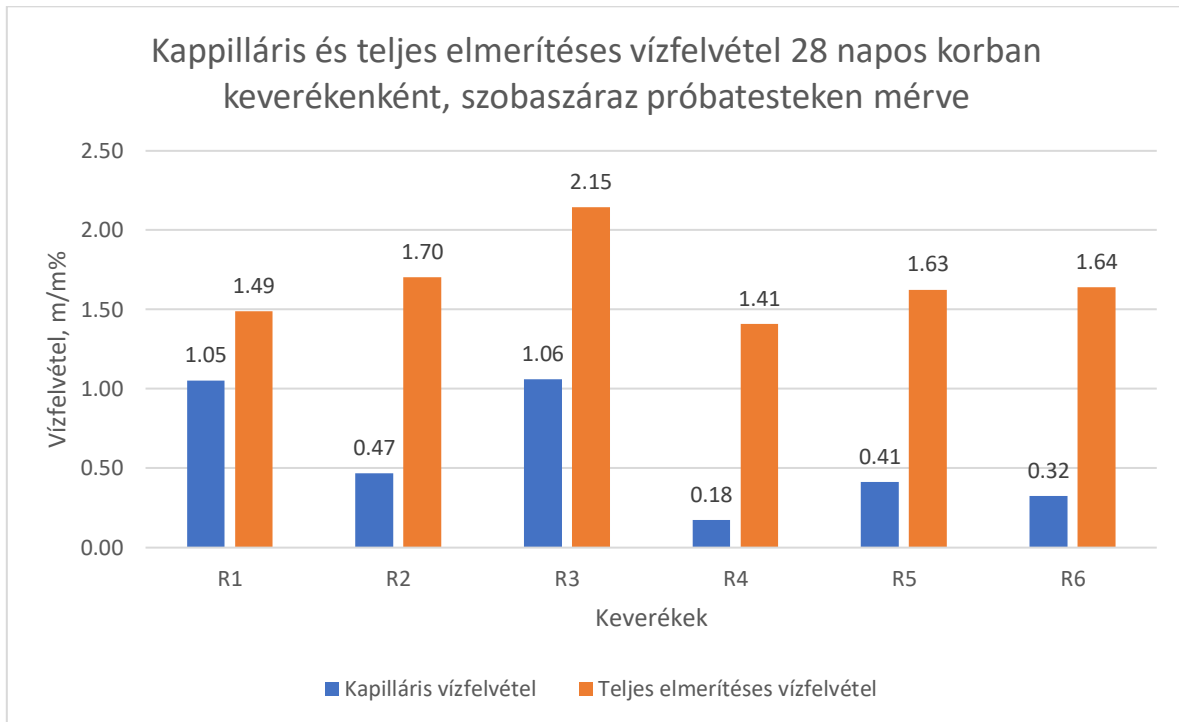
Ábra 6.4-1: Habarcshasábok sűrűségei 28, 56, 91, 182 napos korokban, héiumpiknométeres vizsgálattal mérve



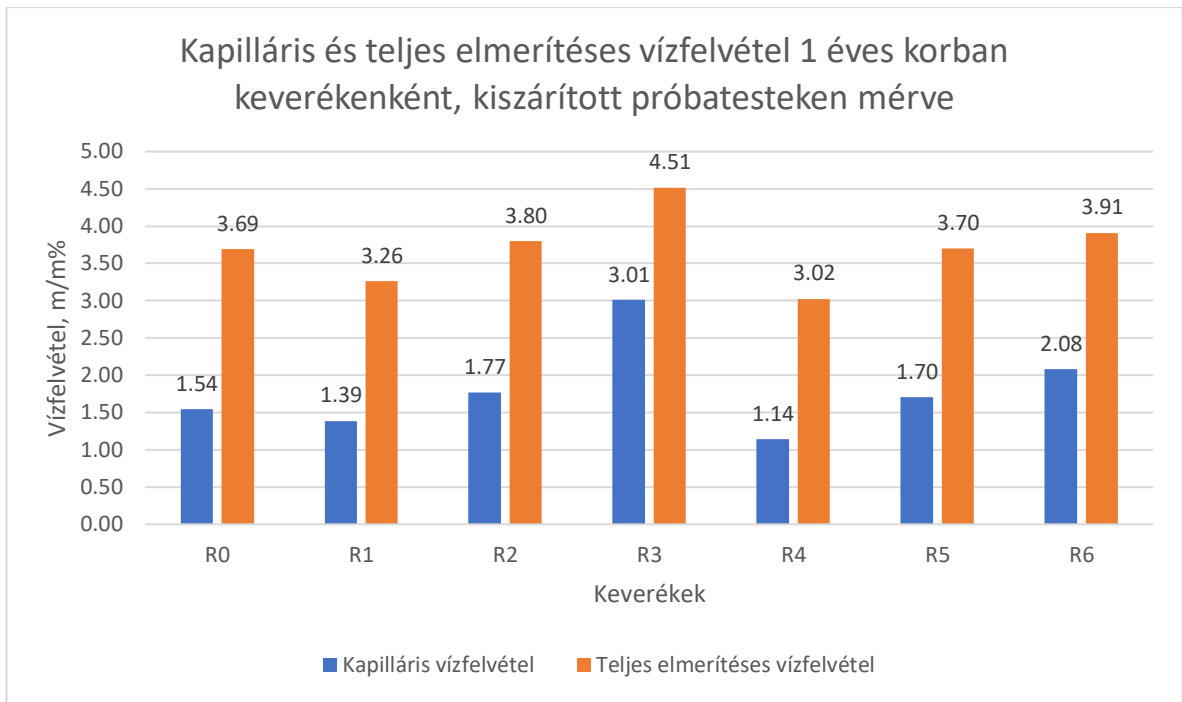
Ábra 6.4-2: Cement kockák sűrűségei 28, 56, 91, 182 napos korokban, héiumpiknométeres vizsgálattal mérve

6.5. Kapilláris és Teljes elmerítéses vízfelvétel

Alább láthatók a kapilláris és a teljes elmerítéses vízfelvétel vizsgálatok eredményei, diagrammokon. Az eredményeket keverékenként átlagoltuk és a vizsgálati korok szerint külön diagrammon tüntettük fel. (6.5-1 és 6.5-2 ábrák) Megfigyelhető, hogy a látszólagos porozitás növekedésével csökken a keverékek szilárdsága. Az eredmények ugyan jellegükben hasonlóak, mint a higanypenetrációs porozimetria eredményei, annak eredményein jobban látszik az R3 keverék kiemelkedően magas porozitása.



Ábra 6.5-1: Kapilláris és teljes elmerítéses vízfelvétel 28 napos korban keverékenként, szobaszáraz próbatesteken mérve

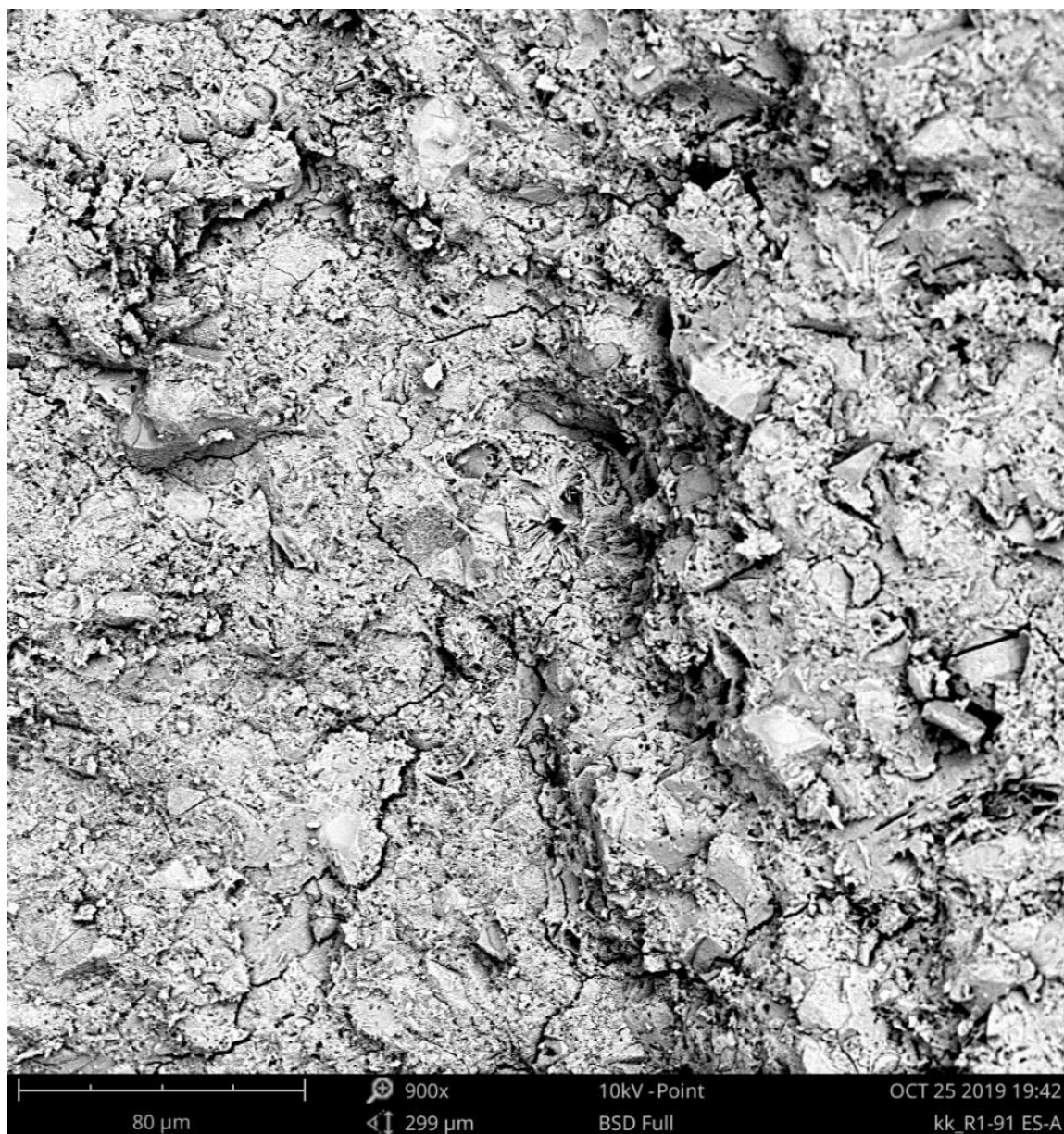


Ábra 6.5-2: Kapilláris és teljes elmerítéses vízfelvétel 1 éves korban keverékeként, kiszáritott próbatesteken mérve

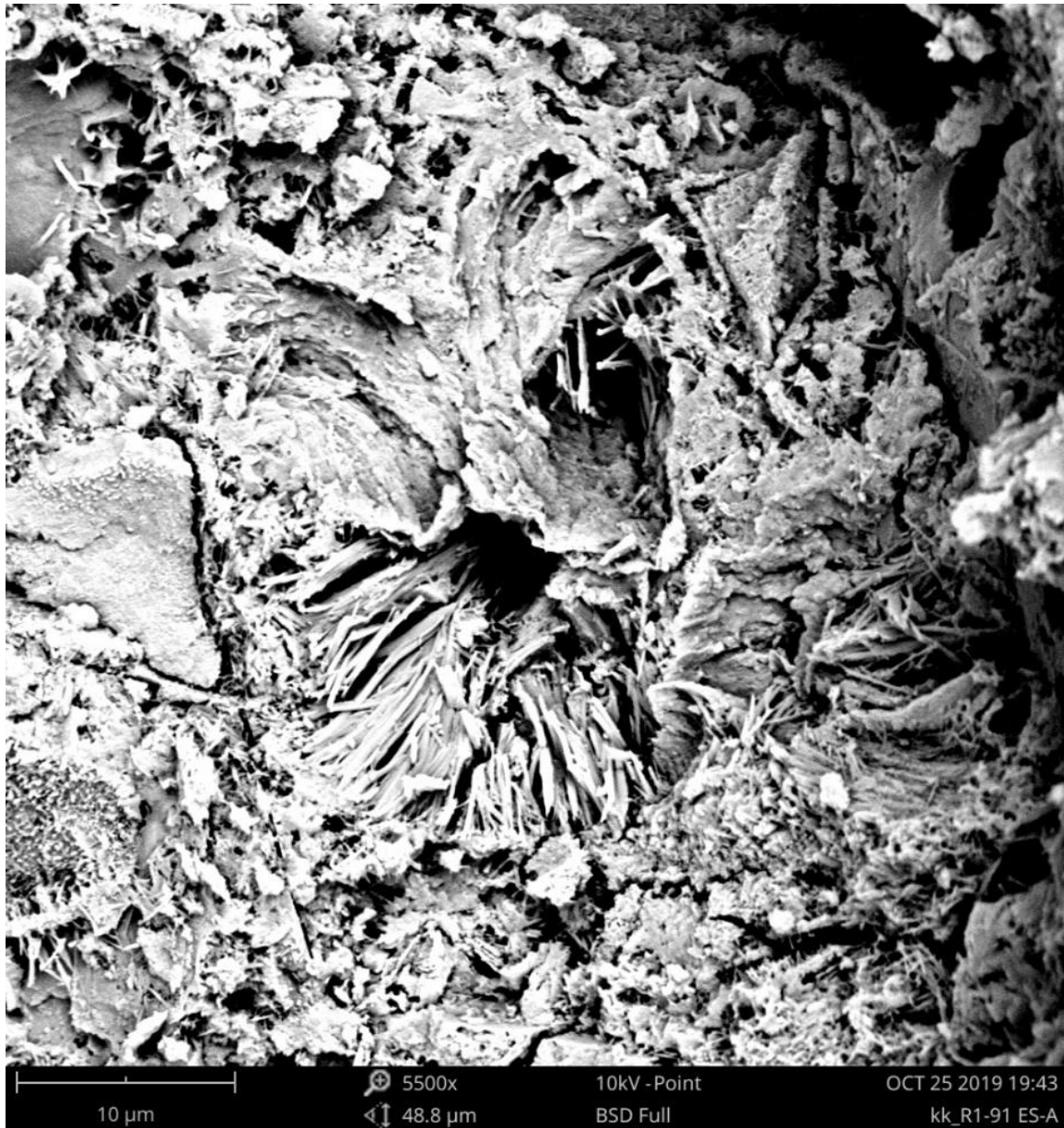
6.6. Pásztázó elektron mikroszkópos megfigyelések

6.6.1. Ecetsavas kezelés

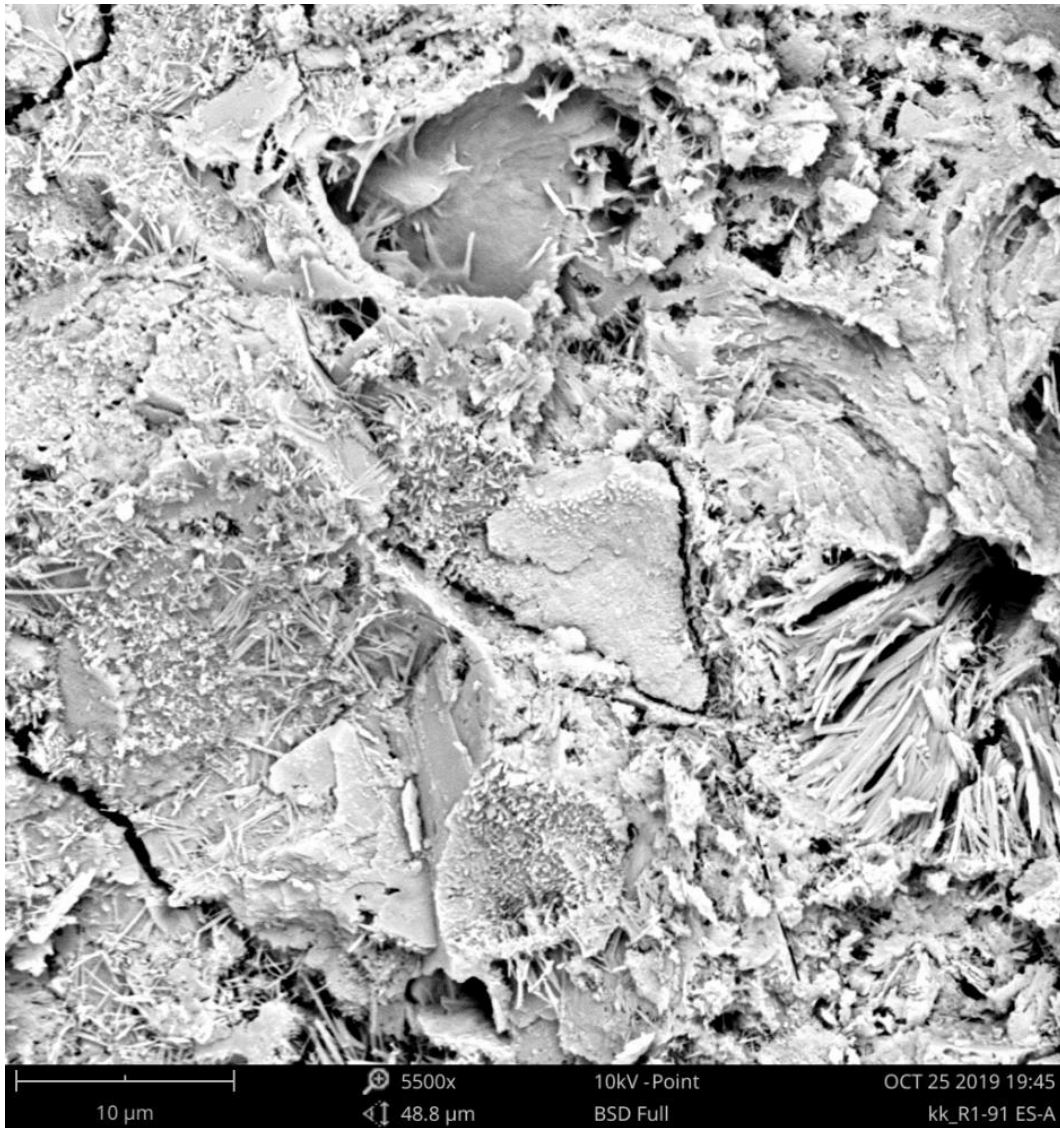
A 6.6-1 képen látható az ecetsavas kezelésen átesett cementkő szövetszerkezete ($M = 900x$). Az *x1. ábra* közepén látható póruskitöltés a 6.6-2 képen $M=5500x$ nagyításban figyelhető meg. Az ecetsavas oldatban ($pH = 3$) történő tárolás hatására a cementpép pórusaiban Ca-acetát kristályok keletkezése figyelhető meg. A 6.6-3 képen a törési felületet benövő apró, vékony Ca-acetát kristályok láthatók ($M=5500x$).



Kép 6.6-1: R1 cementpép, 8 hétig tartó $pH = 3$ ecetsavban történő tárolást követően, $M=900x$ (saját felvétel)



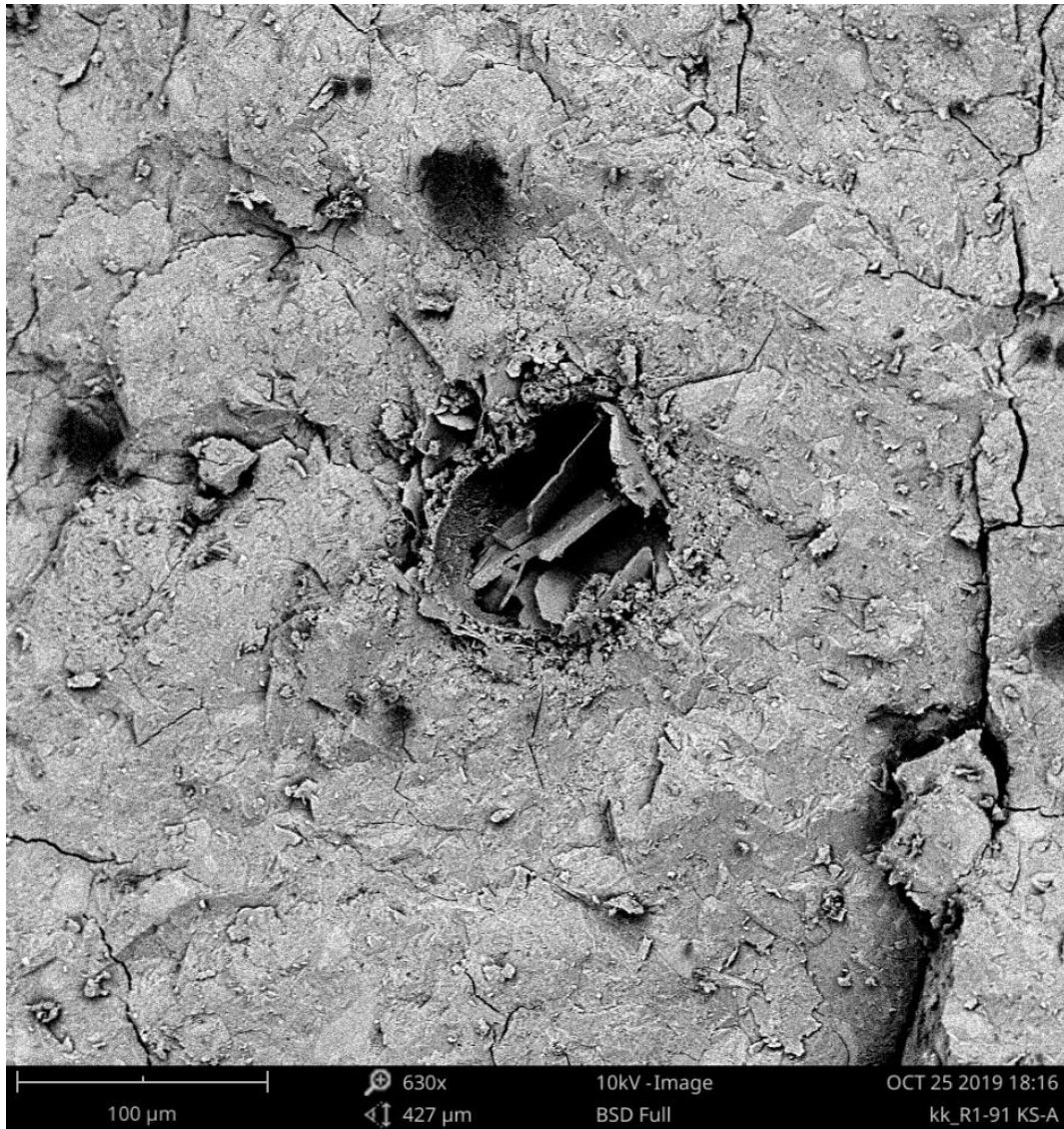
Kép 6.6-2: R1 cementpép, póruskitöltés, 8 hétig tartó pH = 3 ecetsavban történő tárolást követően, M=5500x (saját felvétel)



Kép 6.6-3: R1 cementpép, a törési felületet benövő Ca-acetát kristályokkal, 8 hétig tartó pH = 3 ecetsavban történő tárolást követően, M=5500x (saját felvétel)

6.6.2. Kénsavas kezelés

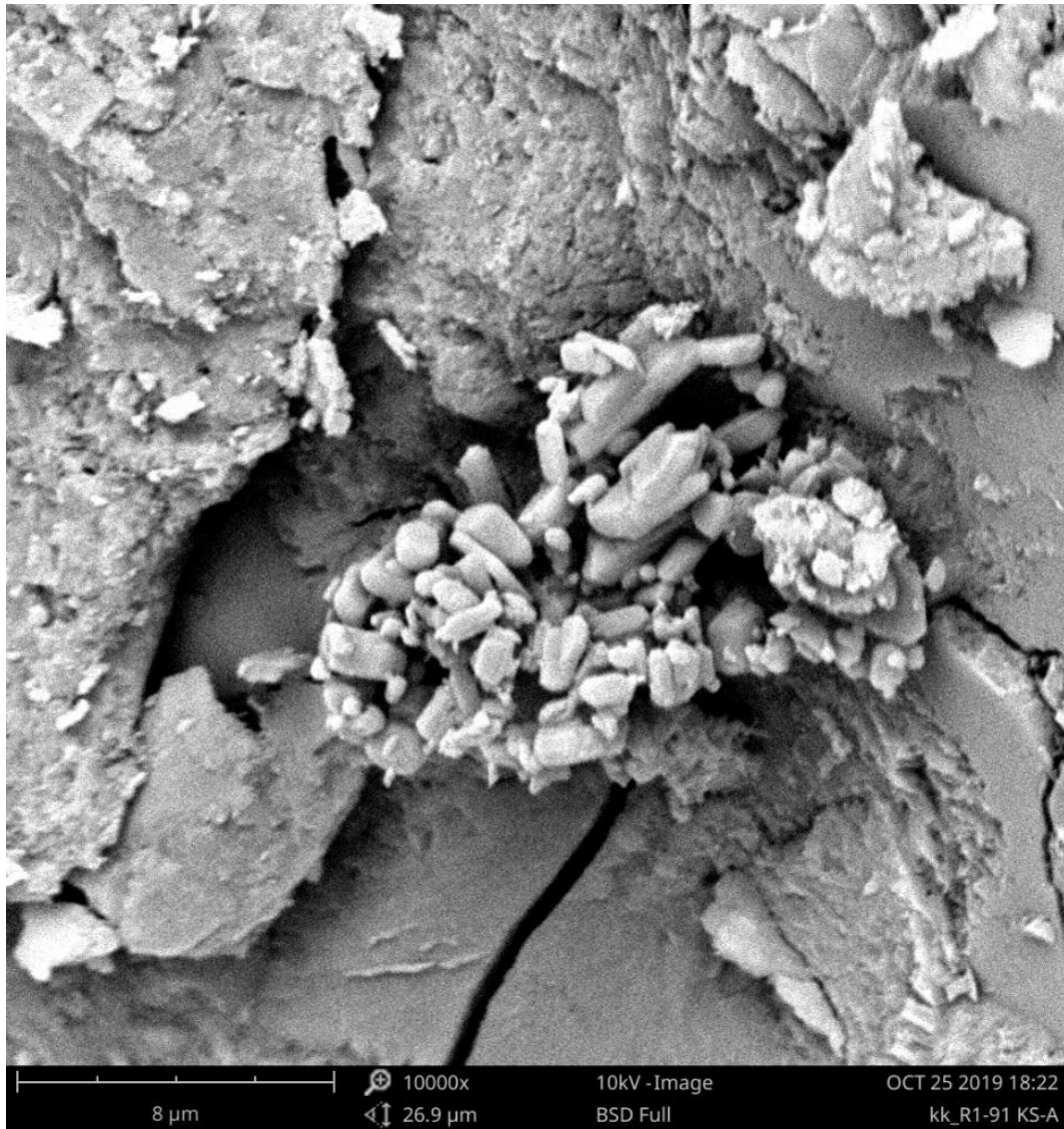
A 6.6-4 képen látható a kénsavas kezelésen átesett cementkő szövetszerkezete (M=630x). A 6.6-4 kép közepén látható pórus a 6.6-5 képen M=2150x nagyításban figyelhető meg. A kénsavas oldatban (pH = 1) történő tárolás hatására a cementpép pórusaiban másodlagos ettringit képződés, vékony túalakú kristályok keletkezése figyelhető meg. A nagyméretű hexagonális táblás kristályok, a még le nem reagált portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristályok. A 6.6-6 képen repedést kitöltő gipszcsomót, apró gipszkristályok halmazát láthatjuk (M=10000x). A gipszképződés a kénsav és a portlandit sav-bázis reakciójának terméke, míg a másodlagos ettringit képződés a kezelés során keletkező (többlet) szulfácionok és az aluminát-hidrátok reakciójának terméke.



Kép 6.6-4:R1 cementpép, 8 hétig tartó pH = 1 kénsavban történő tárolást követően, M=630x (saját felvétel)



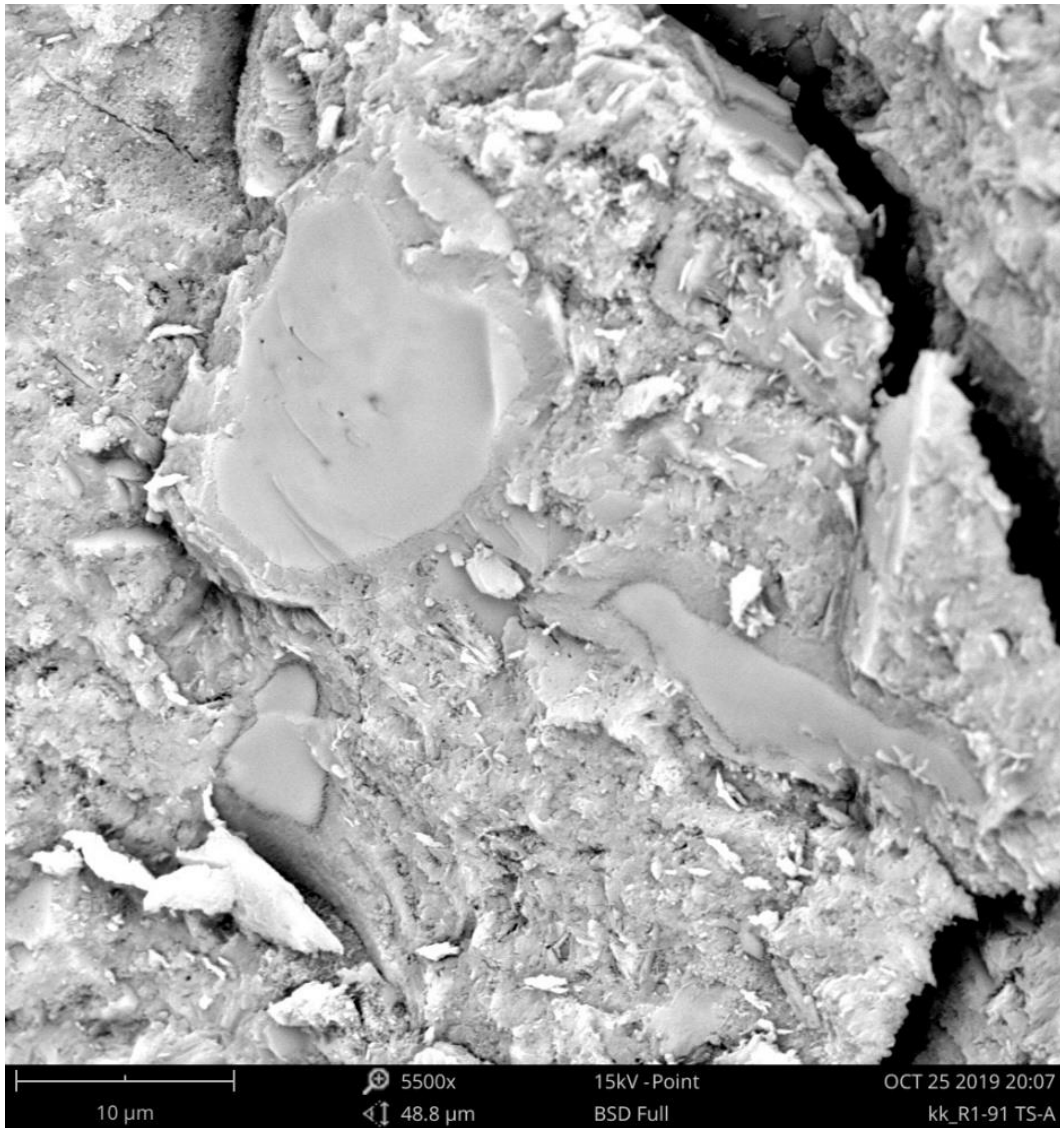
Kép 6.6-5: R1 cementpép, pórus, 8 hétig tartó pH = 1 kénsavban történő tárolást követően, M=2150x (saját felvétel)



Kép 6.6-6: R1 cementpép, repedést kitöltő gipszcsomó, 8 hétig tartó pH = 1 kénsavban történő tárolást követően, M=2150x (saját felvétel)

6.6.3. Tejsavas kezelés

A tejsavas (pH=3) kezelés hatására a cementkő pórusait Ca-laktát csapadék és finom Ca-laktát kristályok töltik ki (6.6-7 kép).

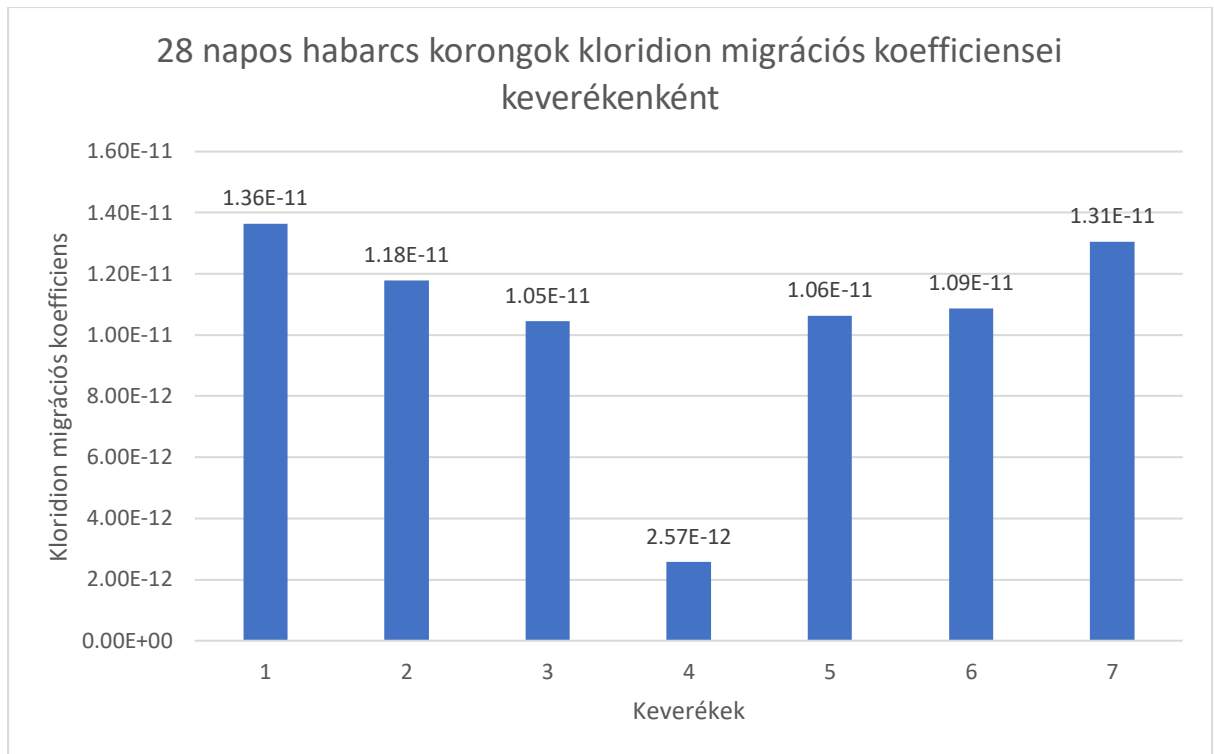


Kép 6.6-7: R1 cementpép, pórust kitöltő csapadék, 8 hétig tartó pH = 3 tejsavban történő tárolást követően, M=5500x (saját felvétel)

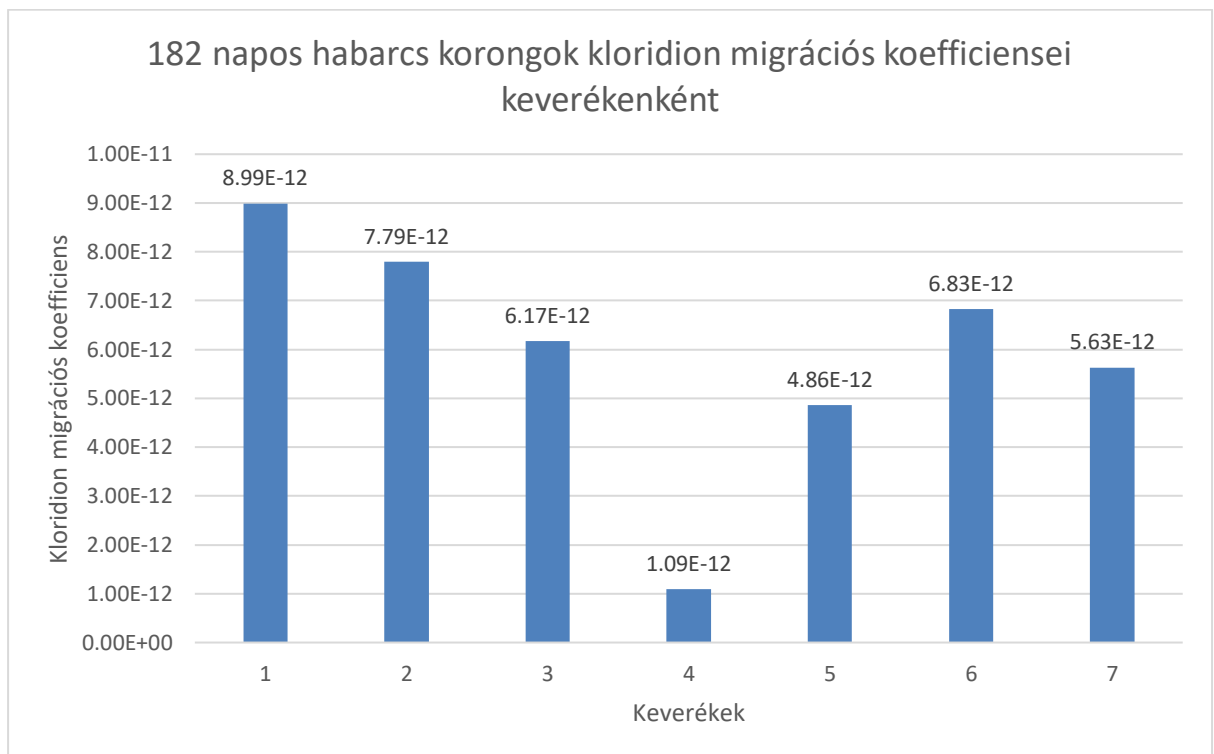
6.7. Kloridion migráció

Alább láthatók a kloridion migrációs vizsgálat eredményei diagrammokon. Az eredményeket átlagoltuk és keverékenként, valamint vizsgálati korokként külön diagrammokon ábrázoltuk. (6.7-1 és 6.7-2 ábrák)

Megállapíthatjuk, hogy 28 napos korban a permeabilitás kloridmigrációval mért értékei az R4 laboratóriumi cementtel készített habarcs esetében a legjobb. Ugyanakkor ez a cement a savállósági kísérletekben is legtöbb esetben a legjobb ellenálló képességet mutatta. Ez egyben azt is jelenti, hogy a cementkő ellenállóképességének biztosításán túl az acélbetét védelmét is el tudja látni.



Ábra 6.7-1: 28 napos habarcs korongok kloridion migrációs koefficiensei keverékeként



Ábra 6.7-2: 182 napos habarcs korongok kloridion migrációs koefficiensei keverékeként

7. Összefoglalás

Kísérletünk során kohósalakkal kevert cementek savkorróziós ellenállóképességét szeretttük volna tanulmányozni. Ezen kívül tanulmányoztuk azon folyamatokat is melyeket fontosnak véltünk a savkorrózió ellenállóképesség szempontjából. Az eredmények alapján a következő következtetésekre jutottunk:

- A legnagyobb szilárdsággal mind habarcs, mind cementpép formában a z R4 és az R5 keverékek rendelkeztek. Ez igaz volt a savkorróziós vizsgálatok utáni szilárdságaikra is.
- Az abrziós folyamatokat szimuláló kísérletein során megállapítottuk, hogy az abrziós hatás leginkább a kénsavas közegben volt hatással az eredményekre, amit a felületre kikristályosodó gipsz eltávolítása ezzel annak szigetelő hatásának megszüntetése indokolhat.
- Az ecetsavas kísérletnél is megfigyelhető az abrziós hatás, szilárdságcsökkentő hatása.
- A tejsav kivételt képez mivel az abrziós hatás nem okozott egyértelmű szilárdságcsökkenést vagy javulást.
- Az abrziós hatások vizsgálatánál megállapítottuk, hogy a „fiatalabb” próbatestekre nagyobb hatással voltak, mint a későbbiekre.
- Megfigyeltük, hogy a tejsavas kezelés hatására több keverék szilárdsága is emelkedett, amit a pórusokat betöltő Ca-laktát kicsapódás következményének vélünk
- Megfigyeltük, hogy összefüggés van az ionbehatolás és a látszólagos porozitás között.
- Az R3-as keverék rendelkezik a higanypenetrációs porozimetria vizsgálat eredményei alapján a legnagyobb porozitással és fajlagos felülettel is, és a jellemző pórustartománya emellett nem jelentősen különbözik a többi keverékétől. Ezzel szemben a relatív nyomószilárdsága savkezelés után nem mutatott kiemelkedően gyenge értékeket.

Az eredmények kiértékelése még zajlik.

Köszönetnyilvánítás:

Szeretnénk köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy kísérleteinkhez a szükséges laboratóriumi és személyi háttérrel biztosította. Köszönetet mondunk Rónaki Viktóriának, Takács Krisztiánnak, Szijártó Annának és Tímár Tamásnak. Köszönetet mondunk továbbá az NVKP_16-1-2016- 0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani konzulenseinknek, Dr. Kopecskó Katalinnak és Dr. Balázs L. Györgynek, akik konzultációink során hasznos tanácsokkal láttak el a TDK dolgozatunk készítése terén.

Köszönettel,

Somlai Bálint, Kovács Marcell

Források:

- (1): Mark Alexander, Alexandra Berton & Nele De Belie ed. (2013) *Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments*, *RILEM State-of-the-Art Reports 10. kötet*, Cape Town, RILEM
- (2): Borosnyói Adorján (2016) Long term durability performance and mechanical properties of high performance concretes with combined use of supplementary cementing materials, *Construction and Building Materials*, 112, pp. 307-324, Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181630280X?via%3Dihub>
[Letöltés ideje: 2019.07.21.]
- (3): Thomas Dyer (2017) Influence of cement type on resistance to attack from two carboxylic acids, *Cement and Concrete Composites*, 83, pp. 20-35 Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946516307806?via%3Dihub>
[Letöltés ideje: 2019.07.20.]
- (4): S. Rehacek (2018) *Issues of Concrete in Silage Pits*. Ebben: IOP Science, *Az IOP Conference Series: Material Science and Engineering kiadványából*, Kuala Lumpur, IOP Publishing Ltd.
- (5): Joanna Julia Sokołowska¹, Piotr Woyciechowski (2018) Effect of acidic environments on cement concrete degradation. Ebben: Peter Claisse, Esmail Ganjian és Tarun Naik (eds.) *Az International conference on sustainable construction materials and technologies kiadványából*, Coventy, International Committee of the SCMT conferences
- (6): Bertron, A., Peyre Lavigne, M., Patapy, C. and Erable, B. (2017) “Biodeterioration of concrete in agricultural, agro-food and biogas plants: state of the art and challenges, *RILEM Technical Letters*, 20, pp. 83-89. Elérhető: <https://letters.rilem.net/index.php/rilem/submission/step/2?submissionId=42> [Letöltés ideje: 2019.07.21.]
- (7): Kopecskó Katalin, Balázs L. György (2019) Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) alkalmazása építőmérnöki gyakorlatban. Ebben: Köllő Gábor (ed.), *XXII Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*, Csíksomlyó, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság.
- (8): Laurent De Windt, Philippe Devillers (2010) Modeling the degradation of Portland cement pastes by biogenic organic acids, *Cement and Concrete Research*, 40, pp. 1165-1174 Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610000748> [Letöltés ideje: 2019.10.20.]

-
-
- (9): Haifeng Yuan, Patrick Dangla, Patrice Chatellier, Thierry Chaussadent (2013) Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack, *Cement and Concrete Research*, 53, pp. 267-277 Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884613001749?via%3Dihub> [Letöltés ideje: 2019.10.22.]
- (10): Yudong Xie, Xujian Lin, Tao Ji, Yongning Liang, Weijie Pan (2019) Comparison of corrosion resistance mechanism between ordinary Portland concrete and alkali-activated concrete subjected to biogenic sulfuric acid attack, Publikálva a jövőben: *Construction and Building Materials* [Nyomtatás előtt] Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819325139?via%3Dihub> [Letöltés ideje: 2019.10.22.]
- (11): Robin E. Beddoe, Horst W. Dörner (2005) Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms, *Cement and Concrete Research*, 35. pp. 2333-2339 Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605001031> [Letöltés ideje: 2019.10.22.]
- (12): Erika Dawn Weber (2005) Testing procedure for assessing the resistance of specimens to sulfuric acid attack, MSc Diploma, Brigham Young University
- (13): Lake Barrett, Gary Hall, Pete Jansen (2013) Prevention of corrosion, erosion & abrasion in cooling towers, Ebben: *2013 Cooling Technology Institute Annual Conference*, Corpus Christi, Cooling Technology Institute
- (14): Jeffrey L. Davis Dana Nica Kameron Shields Deborah J. Roberts (1998) Analysis of concrete from corroded sewer pipe, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 42-1. pp. 75-84. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830598000493> [Letöltés ideje: 2019.10.26.]
- (15): Ivanka Netinger Grubeša, Ivana Barišić, Aleksandra Fucic, Samitinjay S.Bansode (2016): *Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction*, Amsterdam, Woodhead Publishing, Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081003688/characteristics-and-uses-of-steel-slag-in-building-construction> [Letöltve: 2019.07.15.]
- (16): Opoczky L. Gábel V. (2003) *A különörlés előnyei kompozitcementek előállításánál*; Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials, 55-1, pp. 2-7
- (17): Nordtest (1999) NT BUILD 492 *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiment*, Taastrup, Nordtest
- (18): Magyar Szabványügyi Testület (2009b) MSZ EN 12390-5:2009, *A megszilárdult beton vizsgálata. 5. rész: A próbatestek hajlító-húzó szilárdsága*, Budapest, Magyar Szabványügyi Testület
-
-

(19): Magyar Szabványügyi Testület (2009a) MSZ EN 12390-3:2009, *A megszilárdult beton vizsgálata.*

3. rész: *A próbatestek nyomószilárdsága*, Budapest, Magyar Szabványügyi Testület