



Cementkötésű anyagok kémiai ellenállóképességének vizsgálata, a módszerek átfogó összehasonlítása

TDK dolgozat

Somlai Bálint IV. évf.

Konzulensek:

Dr. Kopecskó Katalin, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék,

Dr. Balázs L. György, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék



2020

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	6
2	Célkitűzések.....	8
2.1	A projekt jelentősége	8
3	Szakirodalmi áttekintés	10
3.1	Betonok kémiai korróziója savas környezetben	10
3.1.1	Ásványi savak.....	10
3.1.2	Szerves savak.....	11
3.2	Savkorróziós vizsgálatok kérdése	12
3.2.1	Sav koncentráció	12
3.2.2	Abrázios hatás	13
3.2.3	Nedves-száraz ciklusok (wet-dry cycles)	13
3.2.4	Gépesítés, automatizálás, kialakítás	14
3.2.5	Hőmérséklet.....	15
3.2.6	Mikrobiológiai hatás.....	15
3.2.7	Eredmények kinyerése és értékelése.	15
4	Kísérleti terv.....	17
4.1	Vizsgálati módszerek.....	17
4.1.1	„Statikus”, nem abrázios vizsgálat	17
4.1.2	„Statikus”, abrázios vizsgálat.	18
4.1.3	Gépi forgó abrázios vizsgálat	18
4.1.4	Gépi folyadéksugaras abrázios vizsgálat.....	19
4.1.5	Vizes környezetek vizsgálata	19
4.2	Próbatestek korróziójának mérése	19
4.2.1	Tömegváltozás mérése	20
4.2.2	CT vizsgálat.....	20

4.2.3	Pásztázó elektronmikroszkópia	20
4.2.4	Behatolási mélység vizsgálata fenolftaleines oldattal	21
4.3	Próbatestek.....	21
4.3.1	S – sorozat	22
4.3.2	SU – sorozat	22
4.3.3	Prototípus betonok.....	22
4.4	Összefoglalás	23
5	Eredmények	25
5.1	Tömegváltozás.....	25
5.2	Behatolási felületek tanulmányozása fenolftaleines oldattal.....	31
5.3	CT-vizsgálat.....	33
5.4	SEM-vizsgálat	39
6	Következtetések	46
6.1	A vizsgálati módszerek értékelése.....	46
6.1.1	Statikus nem abráziós vizsgálat.....	46
6.1.2	Statikus abráziós vizsgálat.....	46
6.1.3	Forgógépes vizsgálat	46
6.1.4	Folyadéksugaras gépes vizsgálat.....	47
6.1.5	Általános észrevételek	48
6.2	A mérési módszerek értékelése	48
6.2.1	Tömegmérés	48
6.2.2	Behatolás tanulmányozása fenolftaleinnel	49
6.2.3	Pásztázó elektronmikroszkópia	49
6.2.4	CT vizsgálat.....	50
7	Összefoglalás	51
8	Forrásjegyzék:.....	54

ÁBRAJEGYZÉK

1. ÁBRA: SU1 PRÓBATESTEK TÖMEGVÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK SORÁN	26
2. ÁBRA: SU2 PRÓBATESTEK TÖMEGVÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK SORÁN	26
3. ÁBRA: SU3 PRÓBATESTEK TÖMEGVÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK SORÁN	27
4. ÁBRA: SU4 PRÓBATESTEK TÖMEGVÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK SORÁN	27
5. ÁBRA: SU5 PRÓBATESTEK TÖMEGVÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK SORÁN	28
6. ÁBRA: TÁMFAL BETON PRÓBATESTEK TÖMEGVÁLTOZÁSA A VIZSGÁLATOK ALATT	29
7. ÁBRA: AZ S JELÖLÉSŰ BETONOK STATIKUS KÉNSAVAS VIZSGÁLATUK ELEJÉN (SAJÁT KÉP).....	30
8. ÁBRA: TÁMFAL BETON PRÓBATESTEK TÖMEGVÁLTOZÁSA STATIKUS VIZSGÁLATOK ALATT ÉS VÍZBEN TÁROLVA.	30
9. ÁBRA: AZ S3/1 PRÓBATEST ÁTLAGOS HU ELTÉRÉSE A KEZELÉS ELŐTT ÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	34
10. ÁBRA: AZ S3/1 PRÓBATEST ÁTLAGOS FELSZÍNI KÁROSODÁSA KEZELÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	34
11. ÁBRA: AZ S3/2 PRÓBATEST ÁTLAGOS HU ELTÉRÉSE A KEZELÉS ELŐTT ÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	35
12. ÁBRA: AZ S3/2 PRÓBATEST ÁTLAGOS FELSZÍNI KÁROSODÁSA KEZELÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	35
13. ÁBRA: AZ S3/3 PRÓBATEST ÁTLAGOS FELSZÍNI KÁROSODÁSA KEZELÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	36
14. ÁBRA: AZ S3/3 PRÓBATEST ÁTLAGOS HU ELTÉRÉSE A KEZELÉS ELŐTT ÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	36
15. ÁBRA: AZ S3/4 PRÓBATEST ÁTLAGOS FELSZÍNI KÁROSODÁSA KEZELÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	37
16. ÁBRA: AZ S3/4 PRÓBATEST ÁTLAGOS HU ELTÉRÉSE A KEZELÉS ELŐTT ÉS UTÁN (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	37

KÉPJEGYZÉK

1. KÉP: AZ S JELÖLÉSŰ BETONOK STATIKUS KÉNSAVAS VIZSGÁLATUK ELEJÉN (SAJÁT KÉP).....	17
2. KÉP: A FORGÓ RENDSZERŰ SAVKORRÓZIÓS VIZSGÁLTÍ KÉSZÜLÉK (SAJÁT KÉP).....	18
3. KÉP: A PROTOTÍPUS BETONOK PRÓBATESTJEI FENOLFTALEINES MEGFESTÉS KÖZBEN (SAJÁT KÉP).....	21
4. KÉP: A PROTOTÍPUS BETONOK PRÓBATESTJEI A KORRÓZIÓS VIZSGÁLATOK ÉS MÉRÉSEK UTÁN (SAJÁT KÉP)	23
5. KÉP: EVETSAVAS FORGÓ SAVGÉPPEL KEZELT TÁMFAL TERMÉK PRÓBATEST FENOLFTALEINNEL FESTETT TÖRÉSI FELÜLETE (SAJÁT FELVÉTEL)	32
6. KÉP: KÉNSAVAS FORGÓ SAVGÉPPEL KEZELT TÁMFAL TERMÉK PRÓBATEST FENOLFTALEINNEL FESTETT TÖRÉSI FELÜLETE (SAJÁT FELVÉTEL)	32
7. KÉP: EVETSAVVAL STATIKUSAN KEZELT TÁMFAL TERMÉK PRÓBATEST FENOLFTALEINNEL FESTETT TÖRÉSI FELÜLETE (SAJÁT FELVÉTEL)	32
8. KÉP: KÉNSAVAS FOLYADÉKSUGARAS SAVGÉPPEL KEZELT TÁMFAL TERMÉK PRÓBATEST FENOLFTALEINNEL FESTETT TÖRÉSI FELÜLETE (SAJÁT FELVÉTEL).....	32
9. KÉP: FELÜL: KÉNSAVVAL STATIKUSAN KEZELT TÁMFAL TERMÉK PRÓBATEST FENOLFTALEINNEL FESTETT TÖRÉSI FELÜLETE, ALUL: VÍZBEN TÁROLT PRÓBATEST FENOLFTALEINNEL FESTETT TÖRÉSI FELÜLETE (SAJÁT FELVÉTEL)	32
10. KÉP: AZ S3/1 PRÓBATESTRŐL KÉSZÍTETT CT VIZSGÁLAT VIZUALIZÁLT KÉPE (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.), BALRA A KEZELT PRÓBATEST, JOBBRA A KEZELETLEN PRÓBATEST	33
11. KÉP AZ S3/2 PRÓBATESTRŐL KÉSZÍTETT CT VIZSGÁLAT VIZUALIZÁLT KÉPE (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.), BALRA A KEZELT PRÓBATEST, JOBBRA A KEZELETLEN PRÓBATEST	35
12. KÉP: AZ S3/3 PRÓBATESTRŐL KÉSZÍTETT CT VIZSGÁLAT VIZUALIZÁLT KÉPE (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.), BALRA A KEZELT PRÓBATEST, JOBBRA A KEZELETLEN PRÓBATEST	36
13. KÉP: AZ S3/4 PRÓBATESTRŐL KÉSZÍTETT CT VIZSGÁLAT VIZUALIZÁLT KÉPE (GEOSOFT SZÁMÍTÁSTECHNIKA BT.).....	37
14. KÉP: A T1/T BETONMINTA SEM FELVÉTELE, KÉNSAVAS FORGÓGÉPES KEZELÉST KÖVETŐEN: A KEZELÉS HATÁSÁRA GIPSKRISTÁLYOK KELETKEZTEK A KEZELT FELÜLETHEZ KÖZELI PÓRUSOKBAN	40

15. KÉP: A T1/T BETONMINTA SEM FELVÉTELE, KÉNSAVAS FORGÓGÉPES KEZELÉST KÖVETŐEN, A KEZELT FELÜLETTŐL NÉHÁNY MM MÉLYSÉGBEN: AZ APRÓ GIPSZ KRISTÁLYOKKAL TÖMÖTT SZÖVETSZERKEZET	41
16. KÉP: A T1/T BETONMINTA SEM FELVÉTELE: MONOSZULFÁT KRISTÁLYOK ÉS ZSUGORODÁSI REPEDÉSEK A PÓRUS BELSŐ FELÜLETÉN	42
17. KÉP: A T4/T BETONMINTA A SAVSUGARAS (FÚVÓKÁS) GÉPI KEZELÉST KÖVETŐEN, A SEM VIZSGÁLATRA KIVÁLASZTOTT FELÜLETKÖZELI TERÜLETEN. GIPSZESEDÉS NYOMA NEM TAPASZTALHATÓ.	43
18. KÉP: A T4/T BETONMINTA A SAVSUGARAS (FÚVÓKÁS) GÉPI KEZELÉST KÖVETŐEN, PÓRUS A SEM VIZSGÁLATRA KIVÁLASZTOTT HELYEN: ETTRINGIT ÉS MONOSZULFÁT KRISTÁLYOK HALMAZA A PRÓS BELSŐ FELÜLETÉN.....	44
19. KÉP: A T4/T BETONMINTA A SAVSUGARAS (FÚVÓKÁS) GÉPI KEZELÉST KÖVETŐEN, ELSŐSORBAN ETTRINGIT TŰKRISTÁLYOK A PÓRUSOK BELSŐ FELÜLETÉN	45

Táblázatjegyzék

1. TÁBLÁZAT: A BETON TÍPUSOKON ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK TÁBLÁZATA	23
2. TÁBLÁZAT: A BETON TÍPUSOKON ELVÉGZETT MÉRÉSEK TÁBLÁZATA.....	23
3. TÁBLÁZAT: A VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK ÖSSZEFOGLALÓ TÁBLÁZATA AZOK PARAMÉTEREIVEL.	24
4. TÁBLÁZAT: A CT MÉRÉSEK ÁTLAG ÉRTÉKEINEK ÖSSZEFOGLALÓ TÁBLÁZATA	38
5. TÁBLÁZAT: AZ ELEKTRONMIKROSKÓPPAL VÉGZETT MEGFIGYELÉSEK ÖSSZEFOGLALÓ TÁBLÁZATA.....	39

1 Bevezetés

Jelen TDK dolgozat célja, hogy útmutatást adjon cement kötésű anyagok leromlási folyamataira és azok vizsgálati módjaira, a módszerek összehasonlítására is kitérve. A témakör fontosságára utal a beton szerkezetek kis pH-jú közegekben tapasztalható jelentős leromlása. A témakör megértéséhez speciális ismeretekre van szükség.

Az épített környezetünket meghatározó vasbeton szerkezetek biztonságosabb és hosszabb élettartamú használata fontos szempont. A beton többkomponensű anyagi rendszer, amelynek viselkedését (szilárdságát, tartósságát és egyéb fizikai-mechanikai, valamint kémiai tulajdonságait) jelentős részben összetevőinek tulajdonságai határozzák meg. Jelen TDK kutatás kapcsolódik a hároméves NVKP_16-1-2016-0019, Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című kutatási projekthez, amelynek elsődleges célja, hogy a szokványos betonokhoz képest az agresszív közegekkel ($\text{pH} < 5$) szemben nagyobb ellenálló képességgel rendelkező betonokat fejlesszünk ki. Mindezen elvárások teljesíthetősége alapvető anyagtani, ill. anyagtudományi megközelítéseket igényelnek. Az agresszív környezet hatását modellkísérletekkel, új kísérleti módszerek kidolgozásával és alkalmazásával vizsgáljuk.

Savas környezetben a beton elveszti lúgos kémhatását, és amellett, hogy a beton maga is károsodhat, továbbá nem képes megvédeni a betonacélt a korróziótól. A tartósságot hátrányosan befolyásoló folyamatok az élettartam, valamint a biztonság csökkenéséhez vezetnek.

A beton egyes alkotóelemeinek (pl. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, portlandit) savakkal történő reakciója jól ismert, azonban a heterogén beton leromlása a különféle savas környezetekben rendkívül összetett folyamat.

A jelenlegi szabványokban a követelmény teljesítésére vonatkozó rendelkezéseket, előírásokat fogalmazzák meg (követelmény teljesítésére vonatkozó rendelkezések – deemed-to-satisfy provisions in standards) az agresszív környezetben álló betonok tervezésére. A jövőben a szabványokban ezeket az előírásokat valószínűség elméleti alapon (probabilistic approach) megalkotott modellekre kívánják lecserélni. Mindezen változások, valamint az új technológiák megjelenése is, magával hozza az igényt a pontosabb és elfogadott vizsgálati módszerek kialakítására.

Fontos megjegyezni, hogy savas környezet széles körben előfordulhat például az élelmiszeripar (borászat, húsfeldolgozás, cukorgyártás), a mezőgazdaság (növény vagy

állattartás is), vagy a szennyvíztisztítás (csatornák, szennyvíztisztítók) területén. Ezen körülmények számos kémiai hatásnak teszik ki a beton szerkezeteket, és ennek következménye képpen a mai napig nem létezik a világban általánosan elfogadott, minden környezetre egységesen vonatkozó vizsgálati módszer.

A cementkötésű anyagokat (habarcs, beton) érő agresszív kémiai hatásokat eltérő jellegű, de beton szerkezetek környezetében gyakran előforduló (ásványi – kénsav és szerves – ecetsav) savas környezettel modelleztük: a kutatás során fejlesztett savkorróziós gépekkel dinamikus módon (abráziós hatással), valamint kézi módszerrel statikus módon (abráziós hatással és anélkül) vizsgáltuk.

Jelen kutatás eredményeket szolgáltat és válaszokat fogalmaz meg az eltérő tulajdonságú környezeti hatásoknak megfelelő vizsgálati körülmények és módszerek értékelését követően, a megfelelő vizsgálati módszerek széleskörű elfogadtatása.

2 Célkitűzések

Kísérletsorozatunk elsődleges célja egyes kísérleti betonreceptúrák (- típusok) kémiai ellenálló képességének összehasonlítása volt, egyfajta ásványi savas (kénsav) és egyfajta szerves savas (ecetsav) környezetben. Ezek alapján szeretnénk volna meghatározni, mely vizsgálati eljárások alkalmasak rendszeresített laboratóriumi eljárások felállítására, és melyek az egyes eljárások előnyei, hátrányai, esetleges hiányosságai, hogyan fejleszthetők tovább, milyen javaslatokat tudunk a gyakorlati alkalmazáshoz egyes módszerek esetén megfogalmazni. Másodlagos célunk volt megfigyelni azon módszereket, amelyekkel a savak által okozott károsodást lehet mérni. Nemzetközi viszonylatok

Amióta a beton építmények korróziós problémái ismertté váltak, több vizsgálati eljárás is kidolgozásra került (Alexander et al., 2013). Ezek több területen is eltérőek egymástól, és a hozzájuk kapcsolódó elméletekben sem értenek egyet teljes mértékben. Ezen okokból egyik vizsgálati módszer sem terjedt el széles körben, így ugyan léteznek szabványok kémiai korrózió ellenállóképesség vizsgálatára, ám ezek (és más vizsgálati kialakítások) nagy része nem veszi figyelembe a probléma komplexitását, nem ad megfelelő utasítást a különböző korróziós helyzetek modellezésére, vagy használatuk nem gazdaságos nagyobb léptékekben. A vizsgálati módszerek eltérnek, vagy ellentmondanak egymásnak a következő területeken: a savas környezet kialakítása, annak preferált paraméterei és változói (mely értékeket kell vizsgálni, vagy melyeket kell állandó értéken tartani). Nincs egyetértés továbbá abban, hogy a korrózió hatását miként lehet optimálisan értékelni, milyen módon lehet mérni a korrózió által okozott kárt, és az milyen arányban befolyásolja a beton egyes tulajdonságait a szerkezet élettartama során.

Az Eurocode, és annak magyar nemzeti kiegészítése is, követelmények teljesítésén alapul, amely így nem tud figyelembe venni számos esetet. Cél a jövőben egy valószínűségi alapon kidolgozott követelmény rendszer bevezetése, ám ennek előfeltétele a megfelelő vizsgálati módszerek kifejlesztése és vizsgálati eredmények (a modell bemenő adatainak) széleskörű gyűjtése.

2.1 A projekt jelentősége

A projekt fontos adatokat és megfigyeléseket biztosíthat egy vizsgálati protokoll vagy szabvány kialakításához, valamint kiindulási pontot adhat további vizsgálatok kialakításához és más módszerek vizsgálatához. A betontechnológia fejlődése több újfajta betontípus

kialakulásához vezetett (szálerősítésű betonok, polimermódosított betonok, stb.), amelyeket további új betontípusok kialakulása fogja követni. Ezen új betontípusok megjelenése egyre nehezebbé fogja tenni a savkorrózióval szembeni ellenállóképesség meghatározását a jelenleg használt módszerekkel, illetve az egyes keverékek ellenállóképességének összevetését. Annak érdekében, hogy megállapíthassuk, milyen típusú vizsgálatokat érdemes végezni és ezeket, hogyan és mi alapján érdemes kiértékelni, vizsgálni kell a már kifejlesztett módszereket.

Jelen dolgozatban a vizsgálati eljárások tekintetében a projekt során elért állapotot, vizsgálati eredményeket tudjuk értékelni és összevetni.

3 Szakirodalmi áttekintés

A témában megjelent szakirodalom a legtöbb esetben egy specifikus körülménnyel vagy egy vizsgálati módszerrel foglalkozik. Nehezen található átfogó írás, amely több körülmény egyszeri vizsgálatáról vagy vizsgálatok összehasonlításáról szólna.

3.1 Betonok kémiai korróziója savas környezetben

A savas környezetek lúgos kémhatású betonra gyakorolt hatása jól ismert. A betonban a cementhidratáció lúgos környezetet biztosít (pH: ~12,4), amely megvédi a betonba ágyazott acélbetéteket a fémkorróziótól. Savas környezetben a beton elveszti lúgos kémhatását, ezáltal a továbbiakban nem képes kifejteni védő hatását, a betonacél depassziválódik, a korróziós folyamat kezdetét veszi. Ez egyrészt a betonacél teherbírásának csökkenését, másrészt a korróziós termékek térfogatának növekedésével jár. Ezen felül a beton maga is károsodhat, ami további teherbírás veszteséggel jár. További nehézség, ha a beton kémiai korróziójának valószínűségét nem ismerik fel a tervezést megelőzően. Az agresszív kémiai környezetben megépült szerkezetek esetén fontos lenne a karbantartást is ezen szempontokat figyelembe véve, tervszerűen és rendszeresen elvégezni. Számos vasbeton műtárgy épül napjainkban is, amelyek esetében szükséges a kémiai ellenálló képesség ismerete vagy fokozása. (Bretron et al., 2017) (Alexander et al., 2013)

Bár léteznek bevált szabványok és előírások az agresszív környezetnek kitett betonok tervezésére, de ezek nem lesznek megfelelőek a betontechnológiai fejlődés által hozott új betonfajtákra, mint pl. polimerbetonok, nem acél erősítésű betonok, könnyűbetonok, szálerősítésű betonok stb. Ezen új technológiák megjelenése magával hozza az igényt pontosabb vizsgálati módszerek kialakítására.

3.1.1 Ásványi savak

Fontos különbséget tenni az ásványi és szerves savak között, mivel ezek roncsolási mechanizmusai egymástól eltérőek. Különbségek vannak egyes savak viselkedései között is, de jelen esetben az ásványi savak közül csak a kénsavval foglalkozunk.

A kénsav felel a legtöbb, szennyvízkezeléssel kapcsolatos műtárgy károsodásáért, így nagy részt vesz ki a savkorróziós károk összességéből is, de megtalálható mezőgazdasági létesítmények és hőerőművek hűtőtornyainak szerkezeténél is (Barrett, 2013). Ez az erőművek esetén komoly pénzügyi következményekkel is járhat, mivel le kell állítani a termelést a

karbantartások idejére. Leginkább az ún. biogén úton keletkező kénsav jelent problémát, amely baktériumok (pl. *Acidithiobacillus concretivorus*) metabolikus folyamatainak melléktermékeként keletkezik, és évente több milliárd eurós kárt okoz a világon. Ezen károk minimalizálása, a karbantartási költségek csökkentése, valamint a szerkezetek élettartamának növelése érdekében célszerű ezen környezeteknek ellenálló betonok fejlesztése. Ezt segítő ezen betonok ellenállóképességének meghatározására érdemes kifejleszteni átfogó vizsgálati eljárást (Alexander et al., 2013) (Vinckle et al., 1999)

A biológiai eredetű kénsav leggyakrabban a szennyvízben található kénes vegyületekből keletkezik, amelyek több lépcsőben, különböző baktériumok metabolikus folyamataiban vesznek részt. Az ezen folyamatban részt vevő baktériumcsalád az *Acidithiobacilli* névre hallgat és kifejezetten savas környezetekben élnek meg, illetve csökkentik élettevékenységük által környezetük pH-ját. A folyamat első lépéseként a kénes vegyületek kén-hidrogénné (H_2S) redukálódnak. A kénhidrogén illékony vegyület, amely a levegőbe kerül. Itt az oxigénnel reagálva szulfátot (SO_4) képez, amit egy másik baktériumfajta metabolikus folyamata kénsavvá alakít. Ez a folyamat a környezet pH-jának folyamatos csökkenéséhez vezet, miközben a savas környezeteket egyre inkább kedvező baktériumok szaporodnak el, így a pH akár 1-re is csökkenhet (Weber, 2005) (Yuan et al., 2013).

A kénsav korrodáló hatását a cement-mátrixon, azon belül is leginkább a portlanditon ($Ca(OH)_2$) fejt ki. Ezzel kapcsolatba lépve gipsz ($Ca(SO)_4 \cdot H_2O$) majd másodlagos ettringit ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_{32}$) képződik. Mindkét anyag kristályosodása során belső nyomást gyakorol a pórusokra, ezzel akár mikrorepedéseket létrehozva. Ezen repedések gyorsítják a sav további terjedését, így segítve elő a korróziós folyamatot. A gipsz és az ettringit szerepe a korróziós folyamatban azonban még egy vitatott téma. Például egy Houston-ban (USA), beton csatornaelemeken végzett kutatás során, a korrodált elemek behatolási zónájában nem találtak ettringitet (Davis 1998)

3.1.2 Szerves savak

A szerves savak felelnek a mezőgazdaságban és élelmiszeriparban előforduló agresszív savas környezetek többségéért. Legtöbbször bomlási folyamatok melléktermékeként keletkeznek, szerves anyagok tárolása során (silózás, melléktermék tárolás, erjesztés, feldolgozási módszerek). Ekkor több fajta sav is keletkezhet a tárolás körülményei, valamint a tárolt anyagok függvényében, ami tovább nehezíti ezen körülmények megfelelő modellezését.

A szerves savak közül vizsgálatainkhoz az ecetsavat választottuk, mivel ez az egyik leggyakrabban előforduló szerves sav.

Bár az egyes szerves savak korróziós folyamatai eltérnek egymástól, de általánosan a cement-mátrix hidrát fázisaival, elsősorban a portlandittal reagálnak ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), majd ezt követően a CSH (kalcium-szilikát hidrátokat) támadják meg és dekalcinálják. Az így keletkező sók azok oldhatósága szerint és a közeg által kimosódhatnak, amely az adalékanyag részecskék (homok és kavics) közötti cement-mátrix széteséséhez vezet. Amennyiben a kimosódás nem következik be, a reakciótermékek felhalmozódása lassíthatja is a korróziós folyamatot, így fontos lehet a különböző dinamikus hatások és az abrázio hatásának figyelembevétele, valamint az egyes savak egyéni vizsgálata (Alexander et al., 2013) (Rehacek, 2018) (Dyer, 2017). Továbbá a korróziós termékek túltelített oldataiból sók kristályosodhatnak ki, amelyek kristályosodási nyomása is jelentő tönkremeneteli hatással bír.

3.2 Savkorróziós vizsgálatok kérdése

Mint már említésre került, nincsen egységes megállapodás a szakirodalomban a felől, hogy milyen kialakítással kellene folytatni a savkorróziós kísérleteket. Az alábbiakban felsorolásra kerülnek azok a kísérleti paraméterek, amelyek terén eltérések vannak, illetve az egyes szakirodalmi álláspontok.

3.2.1 Sav koncentráció

A savkoncentráció az egyik legnagyobb mértékben eltérő paraméter a különböző vizsgálati eljárásokban. Az eltérések már abban is jelentkeznek, hogy a koncentrációt pH-ban vagy %-ban kellene megadni. A koncentráció alapján alapvetően két nagy csoportra oszthatjuk a vizsgálatokat. Lehet valóság közeli, amikor közelítőleg olyan koncentrációjú a savas oldat, hogy a vizsgált környezetben előforduló pH-t vagy %-os koncentrációt tükrözze. Ezen vizsgálatok előnye, hogy a korróziós folyamat a tényleges környezetben előforduló folyamatokhoz hasonló lesz, és így ezek a folyamatok jól nyomon követhetők, dokumentálhatók. Hátránya, hogy mivel ez kisebb savkoncentrációt jelent, csak a korrózió korai szakaszai figyelhetők meg ésszerű időkereten belül. Ez egyes savtípusok esetén nem jelent problémát, mivel az eredmények extrapolálhatóak, ám más savaknál a korróziós mechanizmusok időben változnak, és így az eredmények nem használhatóak hosszú távú folyamatok elővetítésére. A másik lehetőség a valóságos közeghez képest fokozott savmennyiség használata, azaz gyorsított kísérlet. Ebben az esetben a vizsgálatok rövidebb idő

alatt komolyabb hatást tudnak elérni, és így a korrózió későbbi fázisai is megfigyelhetőek. Kérdéses, hogy az így kapott eredmények megfelelőnek tekinthetőek-e a mechanizmusok megváltozásával egyes savak esetében.

A gyakorlatban sok esetben a második megoldás kerül alkalmazásra, mivel a realitáshoz közeli vizsgálatok jelentősen hosszabb időt vesznek igénybe. Abban azonban nincsen egyetértés, hogy a gyorsított vizsgálatot milyen mértékben növelt sav koncentrációval érdemes tervezni. (Alexander et al., 2013) (De Belie, 2008)

3.2.2 Abráziós hatás

Az abráziós hatást illetően sincsen széles körben elterjedt módszer annak megvalósítására, ám az általánosan elfogadott álláspont, hogy az abráziós folyamatok vizsgálata lényeges. Több különböző módszer került kifejlesztésre és alkalmazásra, több vizsgálati kialakításban, ám ezek miatt a vizsgálati gépezetek kialakítása nagyban eltérő lehet. Az abráziós hatás bevonása a vizsgálatba az áramló folyadék környezet mechanikai hatásait hivatott modellezni, azonban ezeket nem lehet eredeti hatásaikkal egyenértékű hatással helyettesíteni. Egyes környezetek esetén az abrázió nagy hatással van a korróziós folyamatra, így fontos ezek figyelembevétele vizsgálatok tervezésekor.

A legtöbb módszer keféket használ, amikkel a korróziós termékeket, lerakódásokat és a korrodálódott anyag egy részét el lehet távolítani. A legegyszerűbb esetekben a mintákat valamilyen rendszerességgel manuálisan tisztítják meg, ennél bonyolultabb, ha a minták valamilyen mozgást végeznek és ezzel bizonyos időszakonként elhaladnak egy kefe előtt vagy valamilyen más hatás éri őket. Másik megoldás lehet a próbatestek olyan mozgatása, amely nem engedi az üledékek lerakódását, vagy a sav mozgatása olyan módon, hogy ezt érzük el. Ezeknél az eseteknél figyelni kell arra azonban, hogy a minták mozgatása más hatással is járhat, mint ahogyan azt később láthatjuk. (Alexander et al., 2013) (De Belie, 2008)

3.2.3 Nedves-száraz ciklusok (wet-dry cycles)

Az előforduló savas környezetek egy részére jellemző, hogy a korrózió nem állandó körülmények között zajlik, hanem ciklikusan változások zajlanak. Egyik legfontosabb ilyen a nedves-száraz ciklusok hatása. Ez leginkább csatornákra jellemző és abban mutatkozik meg, hogy a beton csatorna falának bizonyos szakasza olyan magasságban helyezkedik el, hogy felváltva van nedves és száraz környezetben. Ez jelentősen megváltoztatja a korrózió mechanizmusait, például a kimosódást, amely hozzájárul a reakciótermékek eltávolításához.

Ennek számításba vétele igen nehéz, ugyanis nincsen megfogható adat arra vonatkozóan, hogy milyen ciklikussággal kellene a kísérleteket folytatni.

Azon vizsgálati módszerek, amelyek, a nedves-száraz ciklusokat is figyelembe szeretnék venni általában adott intervallumonként eltávolítják a savat a környezetből és szárazon hagyják. Azonban itt nem lehet meghatározni a megfelelő időtartamot a szárazon hagyásra, így több vizsgálat ezt a paramétert nem vizsgál. (Alexander et al., 2013) (De Belie, 2008)

3.2.4 Gépesítés, automatizálás, kialakítás

Könnyen belátható, hogy az eddig már említett eltérésekből kiindulva két savkorróziós vizsgálat céljából kialakított eljárás nem fogja ugyanazon elemeket tartalmazni, ugyanis különböző gépesítéssel, vizsgálati eszközökkel fognak rendelkezni. A legegyszerűbb esetben a mintákat egy tárolóba helyezük, amelybe a savas oldatot is öntjük, és azt adott rendszerességgel cseréljük. Annál összetettebb lesz a vizsgálati módszer, minél több tényezőt szeretnénk figyelembe venni. Így az átfogóbb és pontosabb módszerek általában gépesített berendezéseket használnak, amelyek feladata lehet a minták tisztítása, a sav oldat áramoltatása, a minták mozgatása, vagy akár a tömény sav adagolása a pH vagy savkoncentráció szinten tartásáért. Ennek eredménye azonban az, hogy két hasonló körülményt vizsgáló berendezés is nagyban eltérhet egymástól, ami azt jelentheti, hogy hasonló körülményekre kialakított vizsgálatokból nem összevethető adatokat kapunk.

Egy másik fontos paraméter a vizsgálat során a sav utánpótlása. Ez ugyanis történhet több módszerrel is. Lehetséges manuálisan cserélni a teljes savkészletet adott időközönként, vagy csak a pH-t állítani tömény sav adagolásával, hasonlóan periodikusan. Azonban lehetséges a tömény sav adagolását automatizálni is, amely esetben állandó pH mérés mellett annak változása esetén a sav adagolása automatikusan történik. Ugyan az első két opció közti eltérésre nincsen megfigyelés, a periodikus utánpótlás és az állandó utánpótlás között van. Ez annak következménye, hogy a periodikus adagoláskor az új sav oldatba helyezés után annak pH-ja a mintákból kioldódó anyagoknak köszönhetően emelkedni kezd, míg a folyamatos adagolás állandó pH-jú környezetet biztosít. Fontos szempont továbbá a vizsgálat próbatest – savas oldat térfogat aránya. Amennyiben a savas oldatot nem cserélik rendszeresen, és a sav adagolásával tartják állandó értéken a pH-t, a vizsgáló oldatban az oldható sók elérhetik az adott hőmérsékleten az oldhatóságuk határát, ekkor elindulhat ezen sók kristályosodása a beton pórusaiban, amely további károsító hatással bírhat. (Alexander et al., 2013) (De Belie, 2008)

3.2.5 Hőmérséklet

A savkorróziós folyamatok sebességét, mint minden kémiai reakciót, befolyásolja a környezet hőmérséklete. A reakciósebességi állandó hőmérséklet függését az Arrhenius-egyenlet írja le. Abban az esetben, ha savkorróziós vizsgálatok eredményeit akarja valaki felhasználni, fontos figyelni a kísérleti és az eredeti környezetben előforduló hőmérséklet közötti különbségre. A vizsgálatok esetén abból a szempontból fontos a hőmérséklet, hogy két adatsor csak akkor hasonlítható össze, ha az azokat eredményező vizsgálatok azonos hőmérsékleten zajlottak. Az eredeti környezeteket szimuláló vizsgálatok szempontjából fontos ismerni azok jellemző hőmérsékletét, illetve annak ingadozását, bár ezeket a szempontokat laboratóriumi körülmények között meglehetősen nehéz reprodukálni. (Alexander et al., 2013) (De Belie, 2008)

3.2.6 Mikrobiológiai hatás

A legtöbb olyan környezetben, ahol savas kémhatás alakulhat ki, mikrobiológiai aktivitás is jelen van. A mikrobiológiai aktivitás pontos hatása a savkorróziós folyamatokra ritkán ismert. Savas környezetet termelő mikrobák leggyakrabban csatornában vagy szerves anyagok tárolására kialakított létesítményekben fordulnak elő. További probléma, hogy különböző baktériumok szaporodnak különféle pH-val rendelkező környezetekben, így a környezet pH-ját tovább, akár pH 1-ig is csökkenthetik.

A Hamburgi Egyetemen a savtermelő baktériumok családjával (Acidithiobacilli) kapcsolatban olyan vizsgálatokat folytattak, amelyek során a vizsgálni kívánt baktérium típust előre szaporították, majd a vizsgálat során a beton minták környezetébe helyezték. Ezek azonban nagyon körülményes kísérletek. A mikrobiológiai folyamatok hatásainak megismerése fontos az új anyagokkal készülő betonok esetén is. (Alexander et al., 2013) (De Windt és Devilleres 2010)

3.2.7 Eredmények kinyerése és értékelése.

További nehézség a vizsgálatok eredményeinek kinyerése és azok kiértékelése. A probléma onnan ered, hogy egyes kísérletek során különböző módszereket használva nyerhetünk ki adatot a mintákból, amelyek az egyszerű tömegméréstől az elektronmikroszkópos vagy CT vizsgálatokig terjedhetnek komplexitásukban, és ugyanilyen széleskörű, hogy ezen vizsgálatok során milyen paraméterre vagy paraméterekre támaszkodnak.

A legegyszerűbb módszerek a tömeg és térfogatváltozás mérése, azonban ez nem minden esetben reprezentálja jól a korróziós folyamatokat. Például egyes savak korróziós folyamatainak elején megfigyelhető tömeg növekedés amikor a beton pórusai megtelnek reakciótermékekkel vagy valamilyen kikristályosodás történik. Ezen szempontból hasznosabb a szilárdság vizsgálata, mivel az pontosabb adatot szolgáltat a minta épségével kapcsolatban. Azonban a beton tulajdonságaiból kifolyólag csak akkor alkalmazható, ha megfelelő mennyiségű minta vizsgálata történt azonos körülmények között, mivel a cementkötésű anyagok nyomószilárdságára jelentős szórás jellemző. Ezek a módszerek jól alkalmazhatók együtt is. Egy másik probléma az itt felsorolt eredményekkel kapcsolatosan, hogy nem veszik számításba a sav behatolását a betonba, ezt pedig fontos figyelembe venni a betonacél védelme szempontjából. (Alexander et al., 2013) (De Belie, 2008)

A behatolási frontok vizsgálatára több lehetséges módszer is létezik. Ezek közül a legegyszerűbb a minta elhasítása után a belső felület fenolftaleines oldattal kezelése. Ezzel láthatóvá válik, milyen mélységig tudta a sav semlegesíteni a beton lúgos pH-ját 9-es pH értékig (ez a fenolftalein indikátor átcsapási pontja). A vizsgálat elvégezhető kisebb mintacsoporton is, mivel a sav behatolása biztosabban figyelhető meg kevesebb mintán is. Mivel az elhasítás előtt lehetséges más adatok kinyerése is, használható párhuzamosan kombinálva más módszerrel is (tömeg, térfogat mérése).

A legpontosabb képet azok a módszerek biztosítják, amelyek a beton szövetének megfigyelését teszik lehetővé. Ilyenek az optikai mikroszkópos vizsgálat vagy a pásztázó elektron-mikroszkópia (Scanning Electron Microscopy – SEM). Az ilyenkor kinyert képek lehetőséget adnak a behatolási frontok tanulmányozására, valamint a beton állapotának vizsgálatára egyes pontokon. Ez betekintést adhat a korróziós folyamatba, valamint a részletes összehasonlításra ad lehetőséget. Nyilvánvaló probléma az eljárások költség, műszer és időigényessége, valamint a kiértékeléshez szükséges szaktudás. Lehetséges további vizsgálati módszer a computer tomográfhos (CT) vizsgálat, amely a károsodott minta röntgensugár gyengítési tényezője alapján adhat akár vizuálisan is képet a károsodás mértékéről (Lublóy et al., 2019).

Léteznek ezen kívül más megoldások is, mint például a reakcióba lépett kalcium mennyiségének meghatározása a reakciótermékek mennyiségének mérésével, vagy a reagált savmennyiség fogyásának mérésével. Más módszerek a minták ultrahangos vizsgálatára (Vági, 2018) vagy fényképek alapján, méretek meghatározására épülnek (Ma. Guadalupe et al., 2009)

4 Kísérleti terv

Kísérletünk során több vizsgálati módszerrel végeztünk savkorróziós vizsgálatokat beton próbatesteken. A vizsgálatokat úgy állítottuk össze, hogy meg tudjuk figyelni a kiválasztott paraméterek hatását. Összesen hat féle vizsgálatot alkalmaztunk három beton csoporton, ezek közül egy vizsgálati típust (a fűvókás savkorróziós géppel) csak egy betoncsoporton tudtunk végrehajtani, ugyanis akkor nyílt lehetőségünk az egyik gépi berendezést először tesztelni. Általánosan minden módszer gyorsítottnak számít, de vannak eltérések a savas oldatok pH-jában az egyes vizsgálatok esetén. Elvégeztünk több, abrúziós hatást is figyelembe vevő vizsgálatot is, hogy meg tudjuk figyelni az abrúzió hatását is a különböző feltételek mellett. Ezen kívül próbatestek vizes környezetben történő változását is követtük, valamint referenciaként használtuk fel. Gazdaságossági, időigény és nyersanyag rendelkezésre állási szempontok miatt elvetettük a bakteriális-savas környezeteket, a nedves-száraz ciklusokat, valamint az eredeti környezeteket szimuláló vizsgálatokat.

4.1 Vizsgálati módszerek

4.1.1 „Statikus”, nem abrúziós vizsgálat

Statikus vizsgálatnak neveztük azokat, amelyek során nem áramló (tehát álló folyadék térfogatban) folyadék térfogatban tároljuk a próbatesteket. Az ún. statikus vizsgálatot el lehet végezni abrúziós vagy nem abrúziós módon. Az abrúziós módszerben a keletkező reakciótermékeket és fellazuló részecskéket terv szerinti rendszerességgel eltávolítjuk a



1. kép: Az S jelölésű betonok statikus kénsavas vizsgálatuk elején (saját kép)

próbatessék felületéről, legtöbbször valamilyen kézi kefért használva. A nem abrúziós vizsgálat ennél jóval egyszerűbb. Kísérleteink során a próbatesteket savas oldattal töltött tárolókban helyeztük el és azokat lefedve tartottuk. Az oldatot hetente cseréltük és ugyanekkor megmértük a próbatestek tömegét is. Ezek a vizsgálatok képezték az összehasonlítások alapját, mivel itt

nem érte a mintákat a savas oldaton kívül egyéb (abráziós) hatás. Az egyes savas oldatokat és hozzá tartozó próbatesteket külön tárolókban helyeztük el feliratozva. Mind a kénsav, mind az ecetsav koncentrációját úgy állítottuk be, hogy 3,5-ös pH-júak legyenek. A minták 12 hetet töltöttek a savas környezetben, amely során hetente cseréltük az oldatokat, valamint heti gyakorisággal mértük a tömegüket is. A kiindulási és végállapotban a geometriai mértéket is rögzítettük.

4.1.2 „Statikus”, abráziós vizsgálat.

Ez a vizsgálat az előzővel azonos minden szempontból, kivéve azt, hogy a próbatesteket a heti savcsere során, a tömegmérés előtt kefével megtisztítottuk a fellazult anyagtól és a reakciótermékektől (csapadékoktól). Ennek fő feladata az abráziós hatás vizsgálata volt, illetve, hogy viszonyítási alapot adjon a több abráziós vizsgálatához.

4.1.3 Gépi forgó abráziós vizsgálat

Annak érdekében, hogy a dinamikus hatásokat jobban meg tudjuk figyelni, a kutatás során ún. „dinamikusnak” nevezett vizsgálatokat állítottunk fel. A forgó rendszerű savállóság vizsgáló készülék, röviden forgó savgép prototípusait próbáltuk ki a kísérletek során. A dinamikus és abráziós hatást a próbatestek savas oldatban történő intenzív forgatásával érjük el.



2. kép: A forgó rendszerű savkorróziós vizsgálati készülék (saját kép)

A vizsgálat fontos eleme, hogy a kénsav esetében növelt savkoncentrációval dolgoztunk. Ezt azért tettük, mivel szennyvízcsatornáknál akár 1-es pH is kialakulhat, és kíváncsiak voltunk arra, hogy lehetséges-e gyorsítani ezáltal a vizsgálati módszert. A forgógépes kísérleteknél a kénsav esetében 1,5-ös pH-t használtunk. A vizsgálati időt 12 hét helyett 6 hétre tudtuk rövidíteni.

A forgó savgépekből három készült, amelyekbe a habarcsos előkísérletek során kénsavas, ecetsavas vagy tejsavas oldatot használtunk. A beton kísérletek során kétfajta savas körülménnyel üzemeltettünk a gépeket (ecetsavval vagy kénsavval). A próbatestek tömegét hetente mértük.

4.1.4 Gépi folyadéksugaras abrázációs vizsgálat

A dinamikus hatások vizsgálatának egy másik módszereként olyan gépet alkalmaztunk, amelyben a próbatesteket két felületükön folyadék alatti folyadéksugár éri.

Ezt a vizsgáló berendezést a kutatási projekt során fejlesztették, a készüléket csak a prototípus betonok vizsgálata során tudtuk beüzemelni. A vizsgálatot 3,5-ös pH-jú kénsavval végeztük el, hasonlóan a statikus vizsgálatokhoz, amely 12 hétig tartott.

A vizsgálattal az áramló savas környezetek hatását lehet vizsgálni, ami szintén csatornában, illetve víztisztító telepeken fordul elő. Kíváncsiak voltunk továbbá a dinamikus vizsgálatok közti különbségekre is.

4.1.5 Vizes környezetek vizsgálata

Annak érdekében, hogy a savasan kezelt próbatestek változásihoz legyen egy viszonyítási alapunk, referenciánk, a különböző típusú vizsgálati körülményekhez vizes közeggel elvégzett kísérleteket is elvégeztünk. Ennek érdekében a próbatesteket 12 vagy 6 hétre vízbe helyeztük, ugyanannyi ideig, mint ahogy a savas kísérletek folytak. A próbatesteken lévő vizet nem cseréltük a vizsgálat alatt.

Ehhez hasonló módon a harmadik, forgó rendszerű savgépet vízzel töltöttük fel, és a savas vizsgálatokhoz hasonlóan üzemeltettük őket. Ennek célja az volt, hogy meghatározzuk a forgó savgép működése során keletkező abrázációs hatást, savkorróziós hatás nélkül.

4.2 Próbatestek korróziójának mérése

Mint az korábban említésre került, nincsen egységesen elfogadott módszer a vizsgálatok eredményességének kiértékelésére, de legtöbbször minimum két eltérő, egymást kiegészítő vizsgálati eredmény kerül felhasználásra a korrózió mértékének meghatározásakor. Mi több módszert is alkalmaztunk annak érdekében, hogy ezen módszerek között is megfigyelhessük a különbségeket. Ezeket úgy választottuk ki, hogy lehetőleg több paraméter vizsgálatát is bevonjuk.

4.2.1 Tömegváltozás mérése

A legegyszerűbb adatkinyerési módszer, amely elvégezhető a vizsgálatok alatt is, illetve a savas oldatok cseréje/pótlása során is. Minden vizsgált próbatest tömegét lemértük vizsgálat előtt és után, valamint heti gyakorisággal. A tömegekből kiszámítottuk az eredeti tömeghez képesti tömegváltozást, amit az eredeti tömeggel arányosan, százalékos formában elemeztünk. Ezen módszerrel kiküszöbölhetők a próbatestek vágásakor kialakuló méretkülönbségek, valamint a reakciófelület különbségei által okozott hibák.

4.2.2 CT vizsgálat

A kutatás során lehetőségünk volt a kezeletlen, valamint kezelt próbatestek CT vizsgálatára. A CT (computer tomograph), avagy számítógépes tomográfia során a próbatestet röntgen-sugarakkal vizsgálják a próbatestet. A hagyományos röntgen vizsgálattól eltérően a mintákat több irányból is röntgen-sugarakkal vizsgálják, valamint a röntgen-sugarak elnyelődésének mértékét érzékelőkkel rögzítik. A rögzített adatok a belső szerkezet röntgen-sugár elnyelési arányai, amelyek alapján létre hozható a vizsgálati objektum belső szerkezetének, valamint külső morfológiájának 3 dimenziós vizuális megjelenítése, „képe”, amelyen a röntgen-sugarak elnyelése alapján eltérő sűrűségű voxelekben (téregységekben) jelenik meg. Az egyes tiszta anyagok (fázisok, pl. ásványok) ismert elnyelési karakterisztikája és a vizsgált anyagban várhatóan előforduló fázisok ismeretében következtethetünk az anyag belső felépítésre.

A CT vizsgálat előnye, hogy roncsolásmentesen képes adatokat kinyerni a próbatest belső szerkezetével kapcsolatban. Így a minták előkészítését követően, azok vizsgálhatók megőrizve minden tulajdonságukat. A vizsgálat nagy felbontással és pontossággal képes adatokat szolgáltatni a belső felépítésről, így azzal megfigyelhetők a repedések, porozitás, sűrűség és ezek változása. Reményeink szerint a módszerrel további megfigyelésekhez juthatunk a beton próbatestek korróziós jelenségének leírásával kapcsolatosan (Lublóy at al., 2019).

4.2.3 Pásztázó elektronmikroszkópia

A látható fény hullámhosszának felénél kisebb részleteket optikai mikroszkópokkal nem észlelhetjük. Ezek megfigyelésére lehetséges megoldás az elektronmikroszkóp használata. Az elektronmikroszkóp vákuumban gyorsított elektronokat használ az objektum leképezésére, és mivel az elektronsugár hullámhossza nagyságrendekkel kisebb, mint a látható fényé, jelentősen

kisebb méretű tárgyak 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 feltétellel (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, azaz energiadiszerzív röntgen spektroszkópia), amely lehetővé teszi a minta egy részén meghatározni az elemi összetételt. Az összetétel ismeretében könnyebben azonosíthatók a cementmátrixban kialakult kristályok. Ezek alapján lehetőségünk van a különböző savak korróziós hatásait figyelemmel kísérni (Kopecskó és Balázs, 2019), és következtetni az egyes vizsgálati módszerek hatásaira. A TDK dolgozatban megtalálható elektronmikroszkópos felvételek PHENOM XL pásztázó elektronmikroszkóppal készültek.

4.2.4 Behatolási mélység vizsgálata fenolftaleines oldattal

A fenolftalein olyan indikátor, amely lúgos környezetben színtelenről rózsaszínes-lilás (püspöklila) színre vált. Átcsapási pontja 8,3 – 10,00 között van. Ez alkalmassá teszi a savas közeg által közömbösített, ún. behatolási zóna tanulmányozására. Az indikátoros behatolási mélység vizsgálat során a vizsgált próbatestet elhasítottuk, majd a légköri karbonátosodást megelőzve a friss felületre fenolftaleines oldatot porlasztotunk. Így azon részek, amelyeknek a pH-ja ~ 9 fölötti, elszíneződtek, míg azon részek, amelyek pH-ja a savak hatására már pH 9 alá csökkent, a színváltozást nem tapasztaltuk. A felületeket ezután digitális mikroszkóppal vizsgáltuk meg közelebbről. A vizsgálatot alkalmasnak találtunk a behatolási mélység és a behatolási front egyszerű és gyors tanulmányozására.



3. kép: A Prototípus betonok próbatestjei fenolftaleines megfestés közben (saját kép)

4.3 Próbatestek

A vizsgálati szempontok értékelésének kérdése nem követel meg semmilyen megkötést a próbatestek összetételével vagy korával kapcsolatban, így ezen adatokat nem vesszük figyelembe a vizsgálatok során. Azonban meg kell jegyeznünk, hogy minden - betonon

elvégezett – savkorróziós vizsgálatot a beton 56 napos korában kezdtünk meg. A próbatestek azok eredetétől függően vagy próbakockák, vagy előre gyártott vasbeton termékek formájában érkeztek a laboratóriumba, ahol a vizsgálatokhoz vizes vágással a kívánt méretekre alakítottuk őket. Utókezelésük – a 150 mm élhosszúságú próbakockák esetében – vegyes tárolás, vagy pedig – az előre gyártott elemek esetében – a gyári technológia szerinti. A próbatestek vágását legtöbbször 45 és 50 napos kor között végeztük, majd ezt követően vízzel telítettük a próbatesteket. A savkezelés előtt mértük a próbatestek vízzel telített tömegeit, mint kiindulási értékeket. A vízzel telített, kiindulási állapotban levő próbatestek CT vizsgálatát is be kellett ütemeznünk savkezelés előtt. A savkorróziós vizsgálatok kezdetéig a próbatesteket vizes környezetben tároltuk.

4.3.1 S – sorozat

Az NVKP projekt keretében kiindulási (etalon - S sorozat), illetve valamilyen szempont alapján továbbfejlesztett receptúrák (javított - SU sorozat) betonjainak vizsgálata, összehasonlítása. A cél a beton kémiai ellenálló képesség fokozása, az agresszív környezetnek ellenálló betonok fejlesztése. A vizsgált receptúrák között szulfátálló és nem szulfátálló támfal, tokos cső, hengeres cső és szulfátálló akna betonjai találhatóak meg. A próbatesteket 15x15x15 cm-es próbakockákból vágtuk méretre.

4.3.2 SU – sorozat

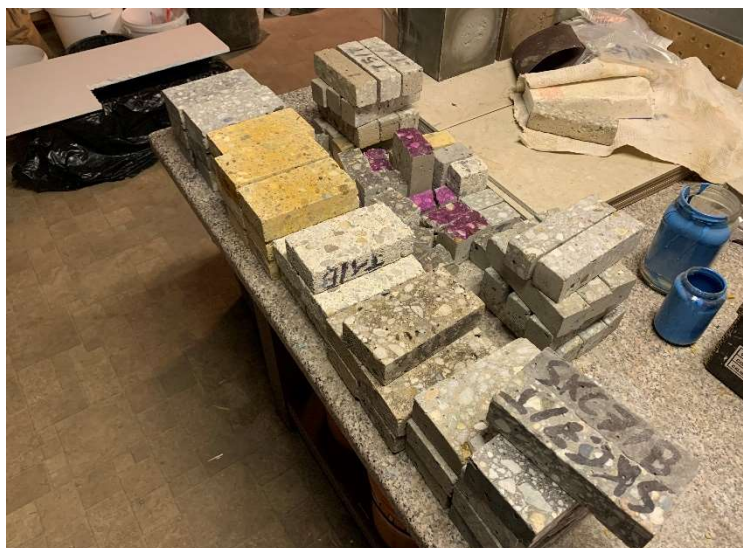
Az S-sorozat javított keverékei, amelyeket a cementpépeken és habarcsokon elvégezett, valamint S-sorozaton elvégzett kísérletek eredményeinek figyelembevételével hoztak létre. A gyártás technológiában és a mintavétel módjában nem volt különbség. A próbatestek 15x15x15 cm-es próbakockákból vágtuk méretre.

4.3.3 Prototípus betonok

A prototípus betonok az NVKP projekt keretében kémiai korrózióknak ellenálló betonok fejlesztésének eredményei. A próbatestek vagy a gyári keverés során készített beton mintákból (15x15x15 cm-es próbakockákból), vagy a betonból készült termékekből (ill. termékekből levágott elemekből) vágtuk a megfelelő méretekre. Ezáltal így megfigyelhető a különbség a laboratóriumban és a gyárban készült betonok, illetve a gyári beton minták és termékekből kimunkált minták között is. Savkorróziós vizsgálatokat végeztük egy támfalhoz tervezett (önthető konzisztenciájú) és egy hengeres csőhöz tervezett (földnedves konzisztenciájú) beton laboratóriumi, valamint gyári mintáin is.

4.4 Összefoglalás

Az 1. – 2. táblázat foglalja össze a kísérletsorozatban felhasznált betonokat, vizsgálatokat, méréseket. Így jobban átlátható, mely vizsgálatokat és méréseket végeztük el egyes mintákon. A 3. táblázat pedig a vizsgálati eljárásokat foglalja össze és jeleníti meg az azok közti eltéréseket.



4. kép: A Prototípus betonok próbatestjei a korróziós vizsgálatok és mérések után (saját kép)

	Statikus		Gépi		Vizes	
	Abráziós	Nem abráziós	Forgó	Fúvókás	Áztatás	Forgó
S- sorozat	X	X	X		X	
SU-sorozat	X	X	X		X	
Prototípus	X	X	X	X	X	X

1. táblázat: A beton típusokon elvégzett vizsgálatok táblázata

	Mérés			
	Tömeg	CT	SEM	Fenolftalein
S- sorozat	X	X		
SU-sorozat	X	X		
Prototípus	X	X	X	X

2. táblázat: A beton típusokon elvégzett mérések táblázata

	Próbatest	Kénsav pH	Ecetsav pH	Idő	Abrázio
Statikus abrázio	4x8x15 cm	3,5	3,5	12 hét	Kefés
Statikus nem abrázio	4x4x15 cm	3,5	3,5	12 hét	-
Forgó gépi	4x8x15 cm	1,5	3,5	6 hét	Forgó mozgás
Fúvókás gépi	4x8x15 cm	3,5	-	6 hét	Folyadéksugár
Áztatás vízben	mindkét	-	-	12 hét	-
Forgó gép vízzel	4x8x15 cm	-	-	6 hét	Forgó mozgás

3. táblázat: A vizsgálati eljárások összefoglaló táblázata azok paramétereivel.

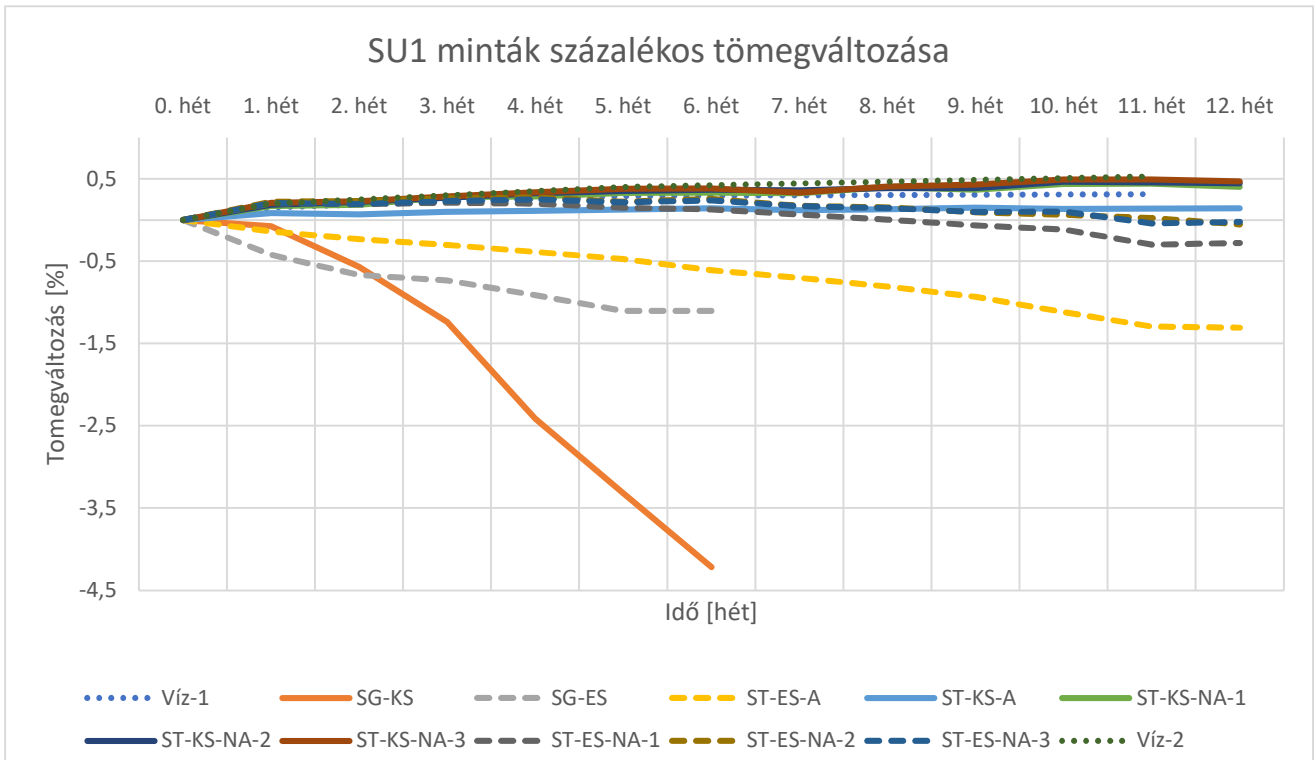
5 Eredmények

Ezen fejezetben az egyes vizsgálatok, illetve a korrózió mértékének vizsgálati eredményeit foglaljuk össze. Továbbá ismertetjük az adatok elemzésének releváns eredményeit is. Az eredmények alapján levont következtetéseinket, valamint a vizsgálatok és a korrózió mértékének vizsgálatára alkalmas módszerek értékelését a következő fejezetben tesszük meg. Több adatcsoport esetén is előfordult, hogy nem volt lehetőségünk minden elkészült diagrammot vagy táblázatot, és így minden adatot itt feltüntetni, ezek megtalálhatók a *Mellékletekben*.

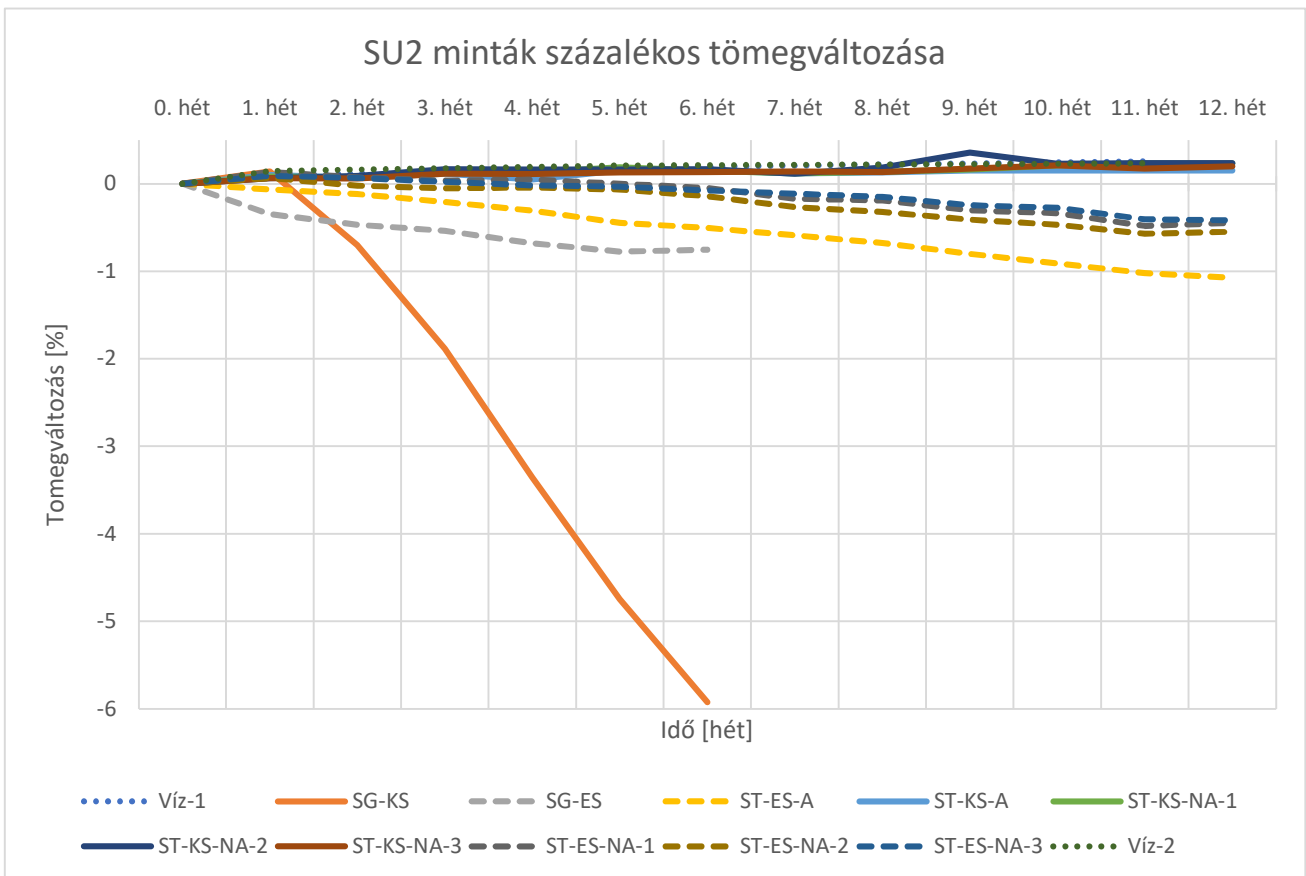
5.1 Tömegváltozás

A tömegváltozást rendszeres gyakorisággal tudtuk mérni. A hetente történő oldat csere, esetleges karbantartás során mértük le a próbatestek tömegét. Az adatokat a próbatestek eredeti tömegéhez viszonyítva százalékos tömegváltozás formájában elemeztük. Így összehasonlíthatók például az etalon betonok és a hozzájuk tartozó javított receptúrák próbatestjeinek vizsgálati eredményei. Az 1-5. ábráon a százalékos tömegváltozás látható betontípusonként. A diagramokon a közegnek megfelelően jelöltük az adatsorokat. Összefüggő vonal jelzi a kénsavval kezelt, szaggatott az ecetsavval kezelt, pontozott pedig a vizes környezetben tárolt próbatestek tömegeinek változását. A jelöléseket a következők szerint alkalmaztuk: savgépes vagy statikus – közeg – abrázio – mintaszám. Ezek alapján a jelölések jelentései.

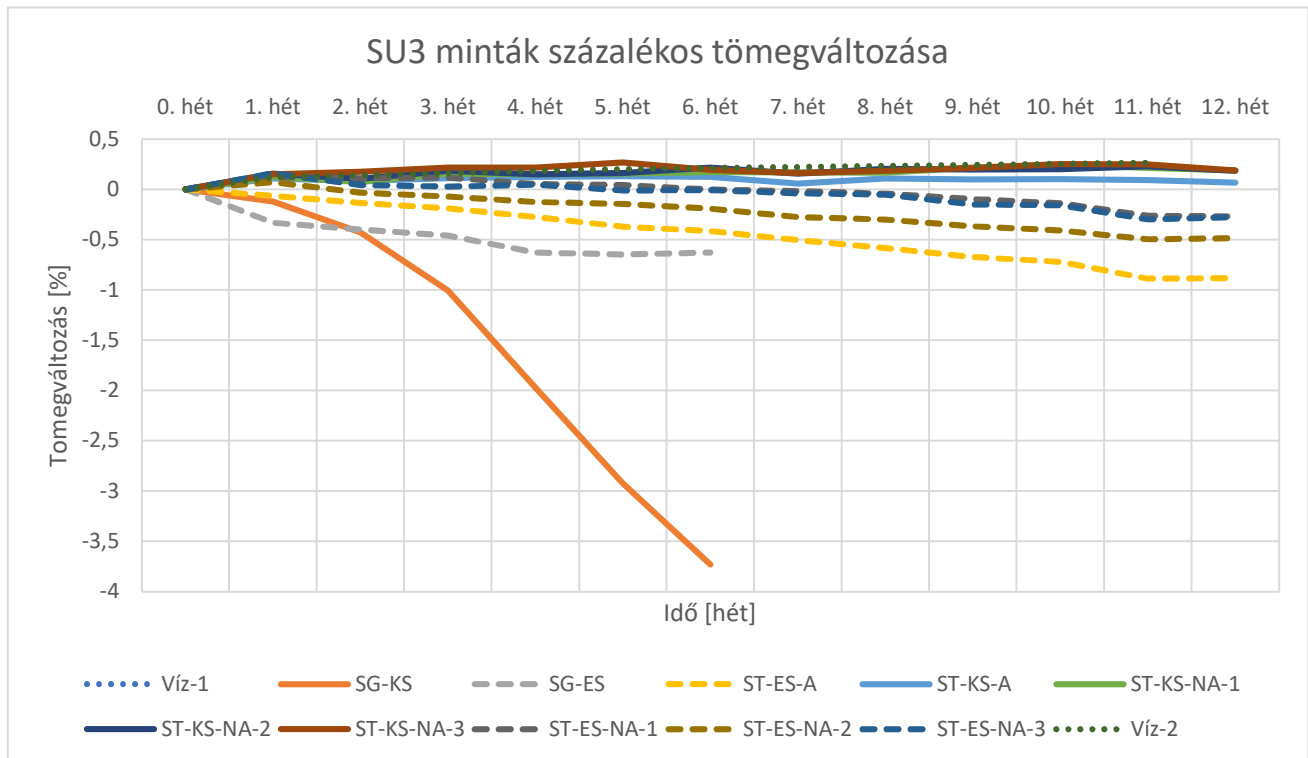
- Víz: vizes környezetben tárolt,
- SG: savgépes vizsgálat / ST: statikus vizsgálat,
- KS: kénsavas közeg / ES: ecetsavas közeg,
- A: manuális abráziónak kitétt / NA: abrázio hatás nélkül.



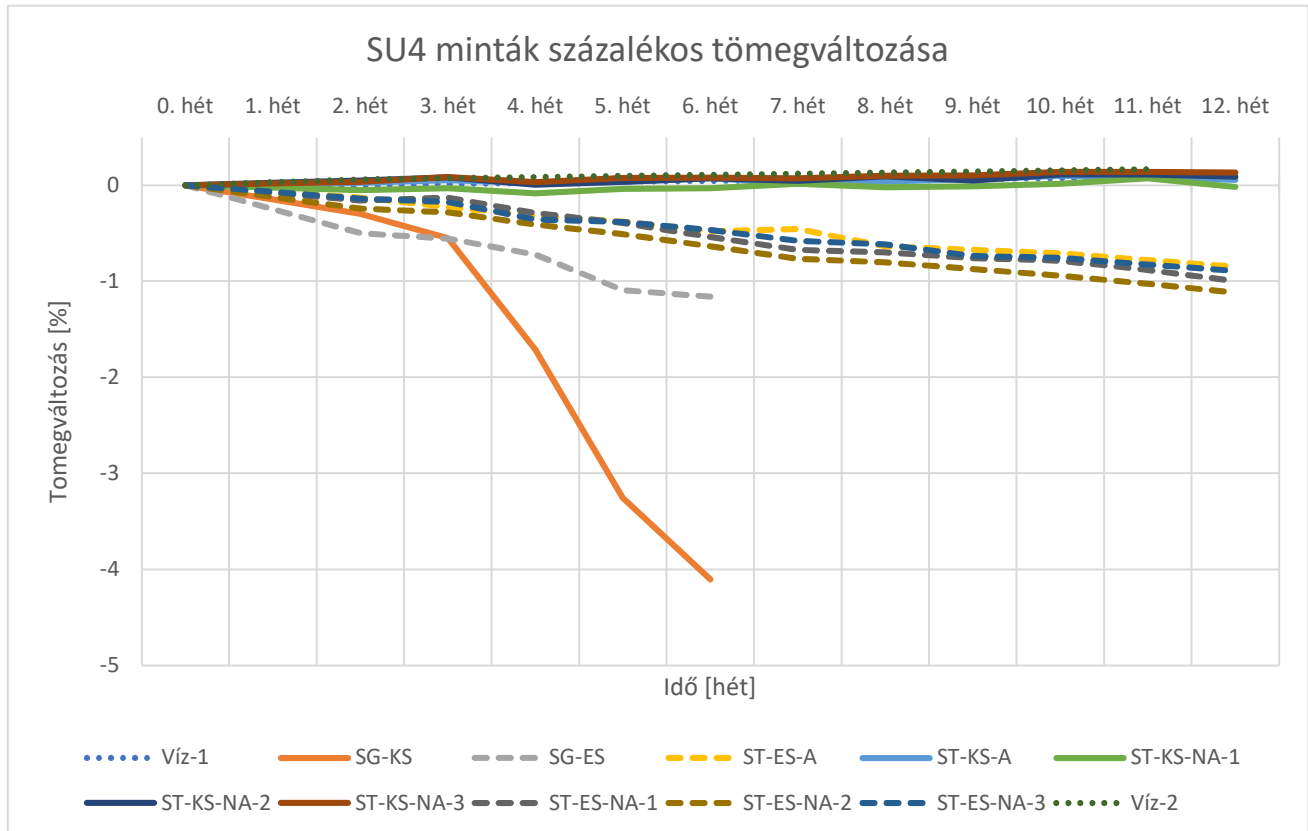
1. ábra: SU1 próbatetek tömegváltozása a kezelések során



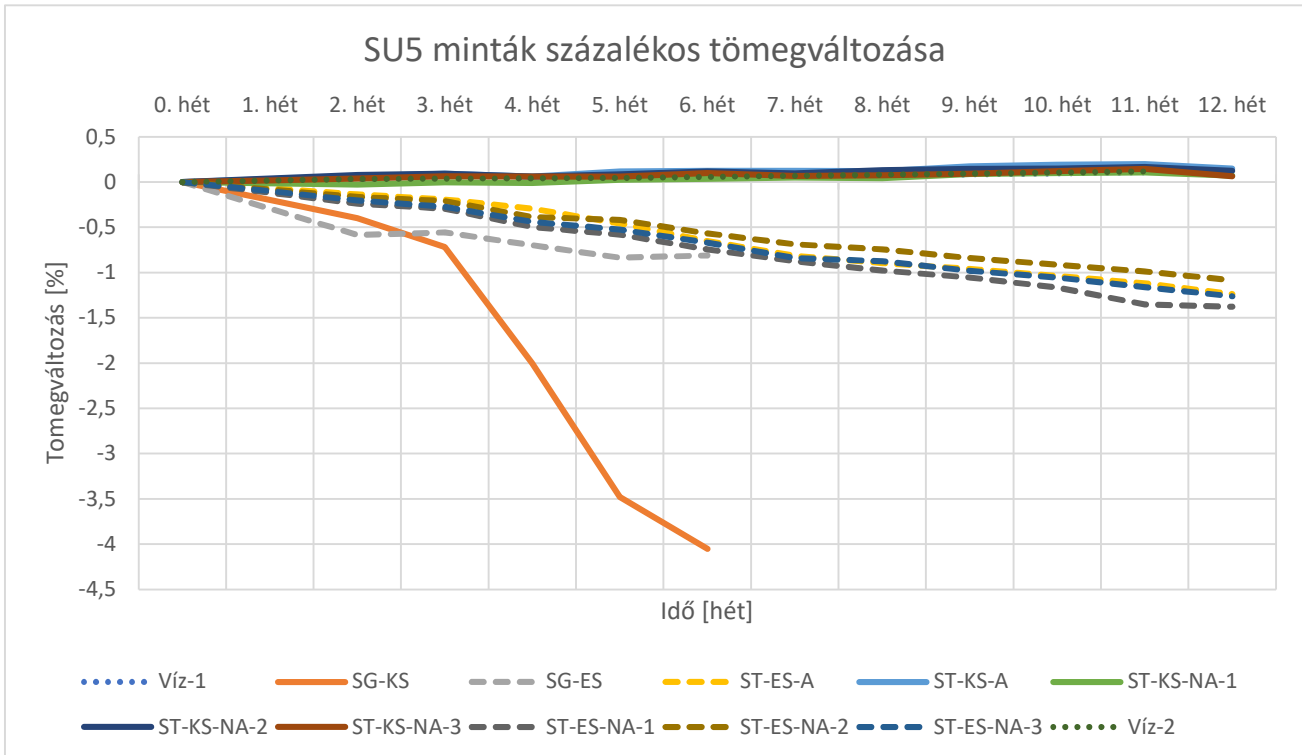
2. ábra: SU2 próbatetek tömegváltozása a kezelések során



3. ábra: SU3 próbatetek tömegváltozása a kezelések során



4. ábra: SU4 próbatetek tömegváltozása a kezelések során



5. ábra: SU5 próbatetek tömegváltozása a kezelések során

A vizsgálati eredményeket elemezve megfigyelhetők a különböző vizsgálati módszerek, valamint a kétféle sav szerinti különbségek. Ezek közül a legfeltűnőbb a kénsavas forgó savgép hatása, amelyben a kezelt próbatetek tömege jelentősen gyorsabb és nagyobb mértékű tömegvesztést szenvedett. Ezzel ellentétben a statikus környezetben kénsavas oldattal, de abrázio nélkül kezelt próbatetek tömege közel azonos módon változott a vízben tároltakéval (a statikus és savgépes kénsavas vizsgálatok nem azonos pH-val folytak). A statikus környezetben kénsavas oldattal, de abrázio hatásal kezelt próbatetek tömege vagy közel azonosan alakult a nem abrázioosan kezeltkével, vagy valamivel nagyobb tömegváltozást szenvedtek. Az ecetsavas közegek esetén a kénsavasokhoz hasonlóan a savgépes vizsgálat nagyobb mértékű és gyorsabb tömegváltozást okozott, mint a statikus vizsgálatok. A statikus vizsgálatokon belül egyes esetekben megfigyelhető az ecetsavas közegben manuális abrázio hatásnak kitett próbatetek eltérő viselkedése, a nem abrázio próbatetekénél nagyobb mértékű tömegváltozása.

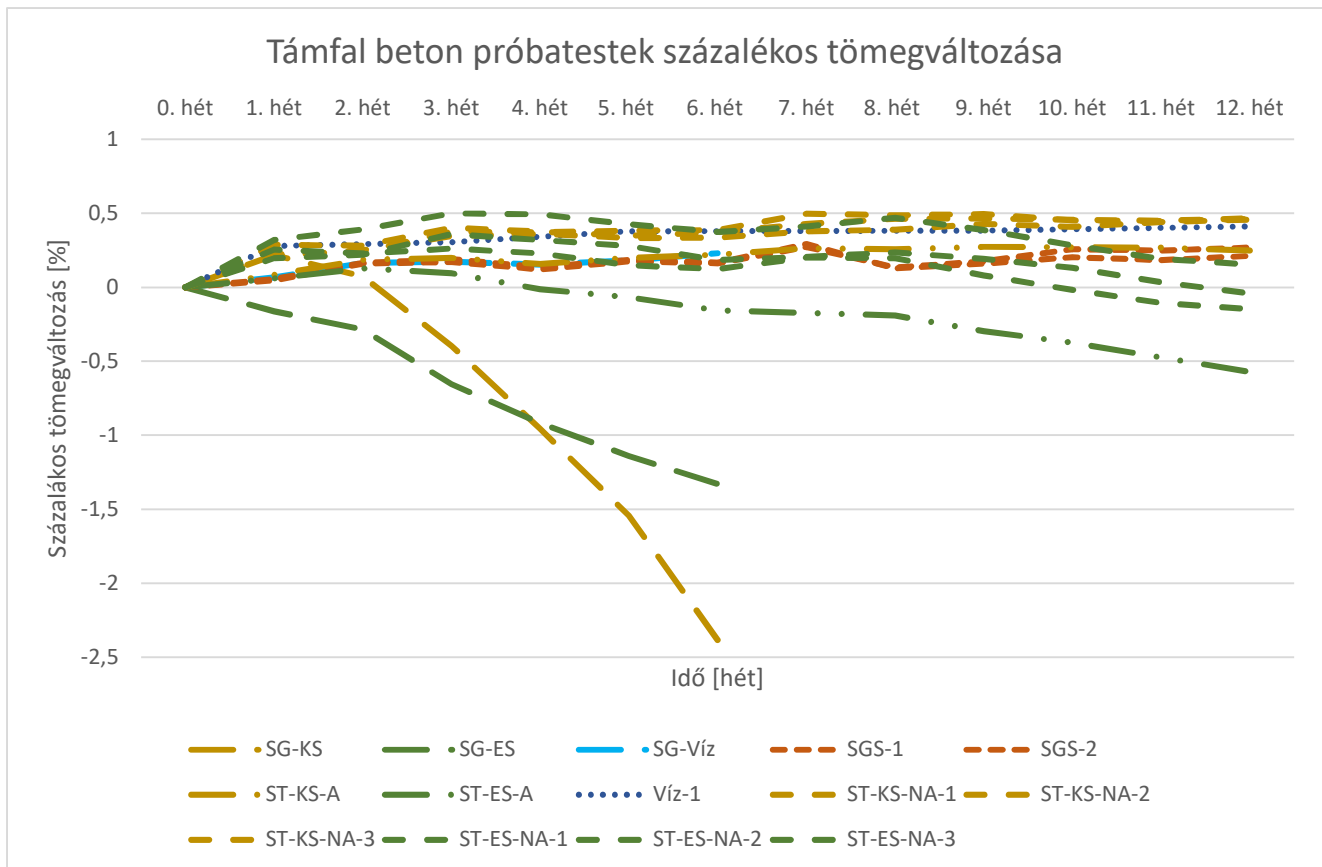
A 6-8. ábrák a Prototípus betonok vizsgálatainak eredményeit ábrázolják, amelyeken mindegyik savkorróziós vizsgálati típust elvégeztünk, így tökéletesek részletes összehasonlításra. Az első táblázat (6. ábra) az összes vizsgálat adatait tartalmazza, ez azonban

meglehetősen sok adat és ezáltal a diagram nehezen értelmezhető. A 7. és 8. ábrák a gépi és a statikus vizsgálatokat tartalmazzák csak, a vizes referenciákkal.

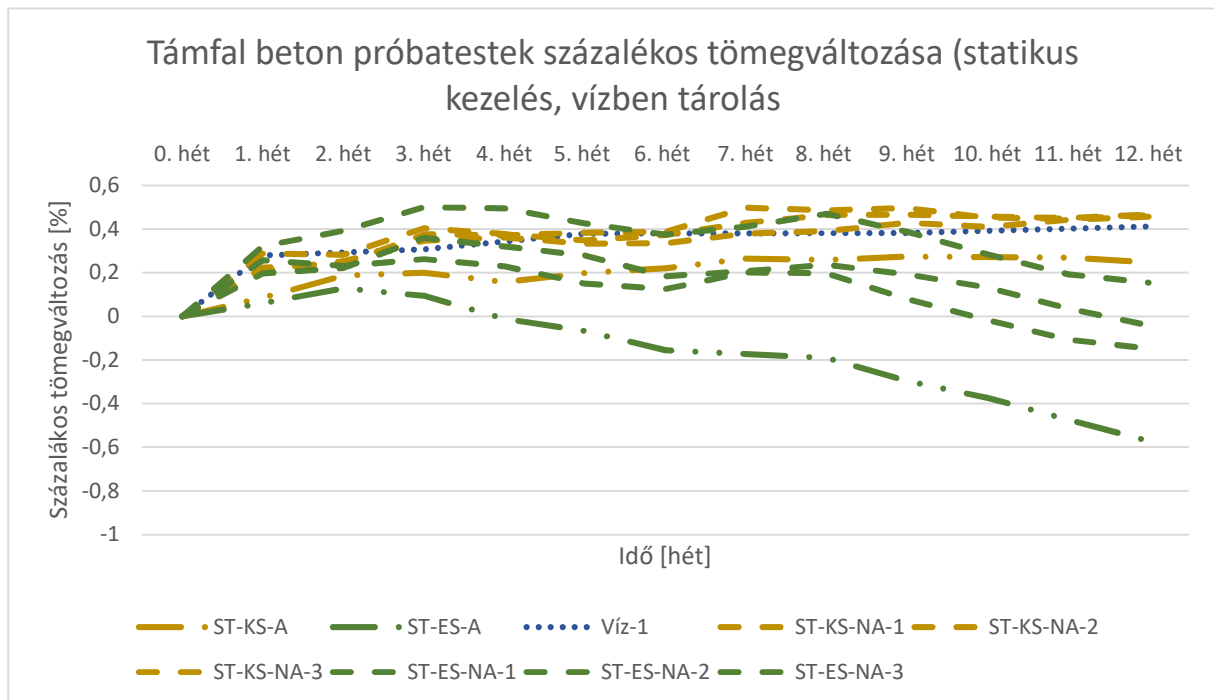
A jelöléseket a következők szerint alkalmaztuk: savgépes vagy statikus – közeg – abrázio – mintaszám. Ezek alapján a jelölések jelentései.

- Víz: vizes környezetben tárolt,
- SG: savgépes vizsgálat / ST: statikus vizsgálat,
- KS: kénsavas közeg / ES: ecetsavas közeg,
- A: manuális abráziónak kitett / NA: abrázio hatás nélkül,
- SGS: folyadéksugaras savgép: SGS, valamint

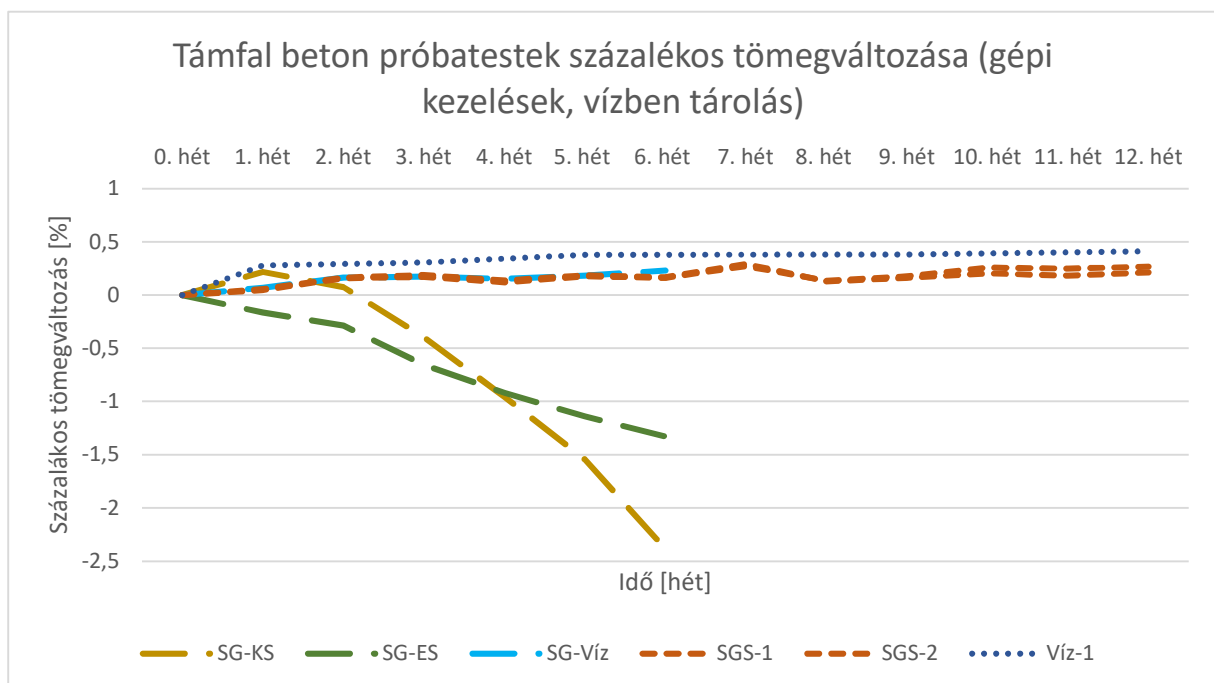
SG-Víz: a forgó savgép vízzel üzemeltetve



6. ábra: Támfal beton próbatetek tömegváltozása a vizsgálatok alatt



8. ábra: Támfal beton próbatetek tömegváltozása statikus vizsgálatok alatt és vízben tárolva



7. ábra: Az S jelölésű betonok statikus kénsavas vizsgálatuk elején (saját kép)

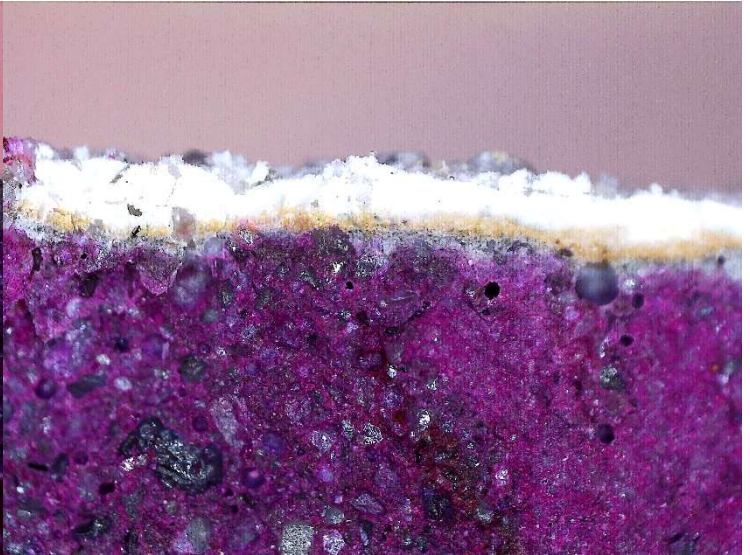
A prototípus próbatestek diagramjain megfigyelhetők a már korábban említett tendenciák: a kénsavas (pH=1,5) forgógépes vizsgálat hozta létre a legnagyobb negatív tömegváltozást (tömegcsökkenést). Ezt követte az ecetsavas (pH=3,5) forgógépes kezelés hatására létrejött tömegcsökkenés. A folyadéksugaras (kénsavas, pH=3,5) 12 hetes vizsgálat és a 6 héten át vízzel üzemeltetett forgó savgépes vizsgálatok eredményei, hatásai egymáshoz hasonlóak, mindkettő esetében a kezelés időtartama alatt a vízben statikusan tárolt próbatestekénél kisebb tömegváltozást szenvedtek (7. és 8. ábrák). (A savval nem kezelt, csak vizes közegben tárolt próbatestek pozitív tömegváltozása a hidratációs folyamat előre haladásának következménye.).

5.2 Behatolási felületek tanulmányozása fenolftaleines oldattal

A fenolftaleinnel kezelt próbatestek kolorimetriás vizsgálatát az 5-9. képeken mutatjuk be. A felvételek digitális mikroszkóppal készültek és a frissen elhasított és indikátorral kezelt minták felületeit örökítették meg. A behatolási mélységek lemérésére sajnos nem volt lehetőségünk, így az itt látható képek az egyes korróziós vizsgálatok közötti jól látható hasonlóságokat vagy különbségeket hivatottak reprezentálni. Az 5-6. képen az ecetsavas és kénsavas forgó savgépekkel kezelt próbatestek behatolási frontjai láthatók. A 7-8. képen az ecetsavas statikus (abrázios hatással) és a folyadéksugaras savgéppel kezelt minták láthatók indikátor oldattal kezelt felületei. A 9. képen pedig a statikus kénsavval, abrázio nélkül kezelt (felül), valamint a vizes környezetben tárolt (alul) próbatesteket láthatjuk.



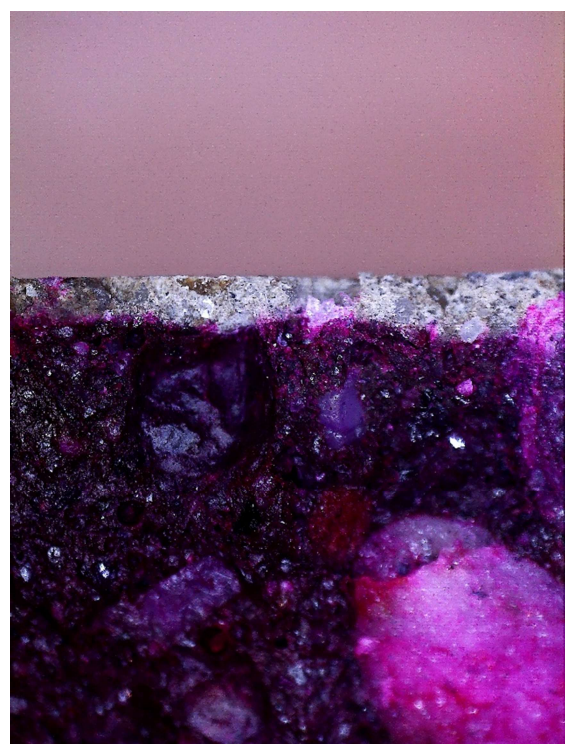
5. kép: Evetsavas forgó savgéppel kezelt Támfal termék próbatest fenolftaleinnel festett törési felülete (saját felvétel)



6. kép: Kénsavas forgó savgéppel kezelt Támfal termék próbatest fenolftaleinnel festett törési felülete (saját felvétel)



8. kép: Kénsavas folyadéksugaras savgéppel kezelt Támfal termék próbatest fenolftaleinnel festett törési felülete (saját felvétel)



7. kép: Evetsavval statikusan kezelt Támfal termék próbatest fenolftaleinnel festett törési felülete (saját felvétel)



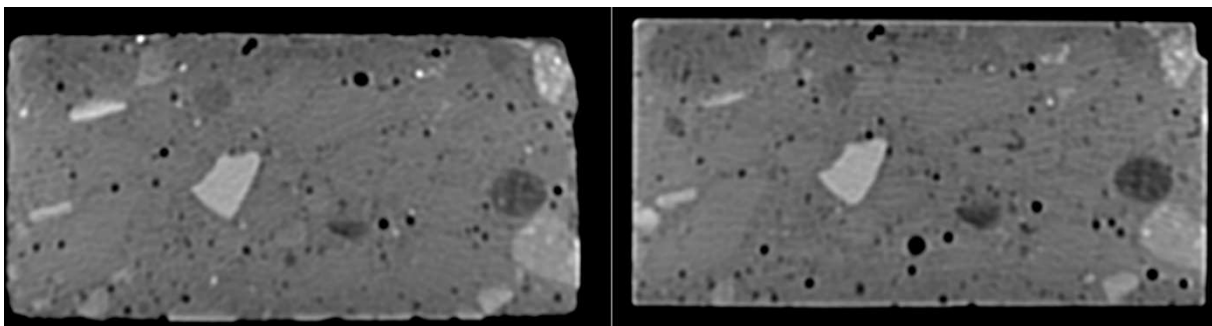
9. kép: Felül: kénsavval statikusan kezelt Támfal termék próbatest fenolftaleinnel festett törési felülete, alul: vízben tárolt próbatest fenolftaleinnel festett törési felülete (saját felvétel)

Az 5-6. képen megfigyelhetjük a forgó savgéppel kezelt próbatestek behatolási frontjait. A 6. képen láthatóak a kénsavra jellemző behatolási front jellegzetességei, a sárgás-barnás vas(II)-ionokban dús réteg, valamint a külső, fehér, gipsszel telített réteg. Az ecetsavas próbatesten nem különíthető el a barnás rétegre jellemző elváltozás, csak egy semlegesített, kifehéredett zóna. A 8. képen megfigyelhetjük a másik savgép hatását, amely a 6. képen látotthoz hasonló, míg a 7. kép az 5. képhez hasonló jelenséget mutat. Az 5-8. képeket a megfelelő (6-8.) diagramokkal együtt tanulmányozva megfigyelhető, hogy a tömegváltozás mértéke nem azonos a behatolás mértékével.

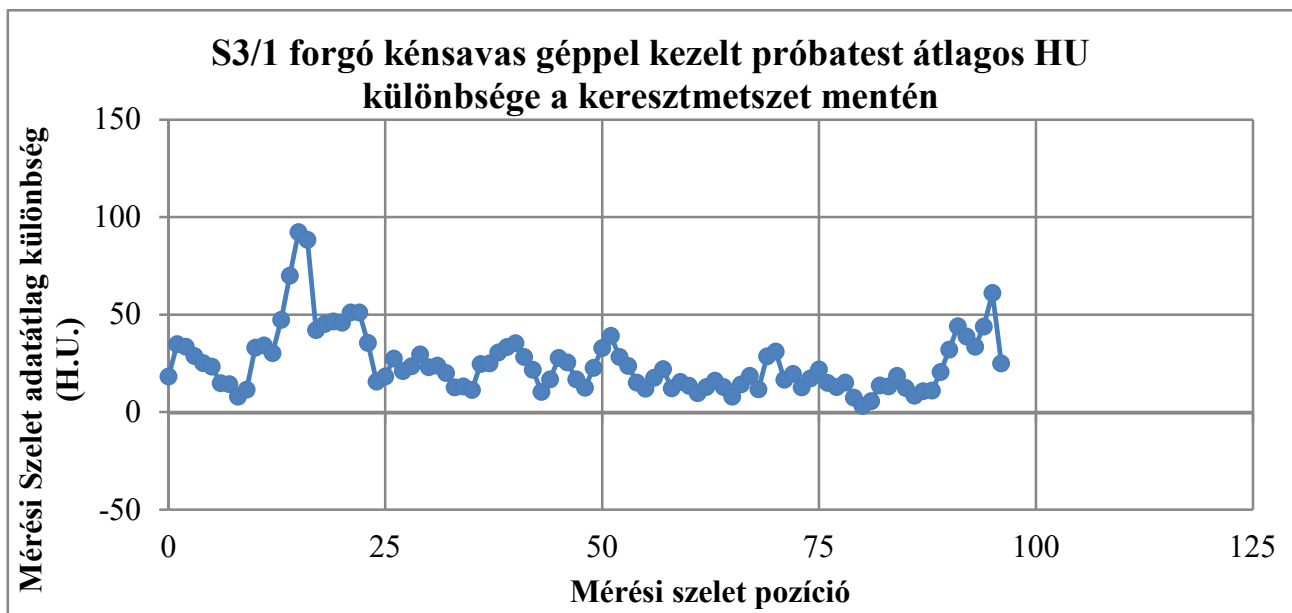
A 7. tömegváltozási diagramon a forgó kénsavas gépi vizsgálat és a folyadéksugaras vizsgálat között jelentős különbséget figyelgetünk meg, amit a behatolási frontokon már nem látunk ilyen egyértelműen. Az előző állítás igaz a forgó ecetsavas gépi vizsgálatra és a statikus ecetsavas vizsgálatra is. A statikus kénsavas vizsgálat és a vízben tárolt próbatestek tömegváltozása a behatolási frontokhoz hasonlóan igen hasonló eredményeket mutatott, ám a behatolási front teljes hiánya a kénsavas statikus vizsgálat esetén nem várt eredmény.

5.3 CT-vizsgálat

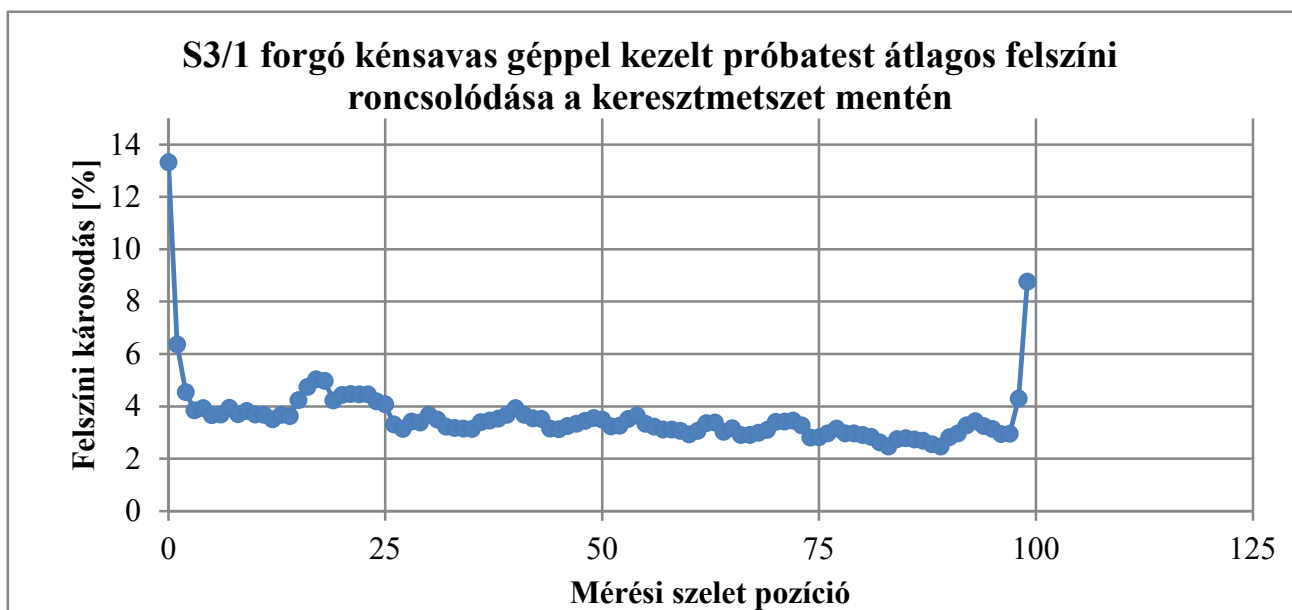
A CT vizsgálatok eredményeként a próbatestek Hounsfield Unit, HU értékeit kaptuk a mérések előtt és után. Ezekből számítva kaptuk a HU változást, valamint felszíni károsodást. Ezeket az eredményeket diagrammokon kaptuk meg az összes vizsgálatra küldött próbatestre vonatkozóan. Ez több, mint száz oldalnyi diagram, amelyeknek bemutatására jelen dolgozat keretein belül nincsen lehetőségünk. A 9-15. ábrákon és a 10-13. képeken az S3-as beton próbatestek kénsavas és ecetsavas forgó géppel kezelt és statikus, abrázio nélkül kezelt próbatétjeinek eredményei láthatók.



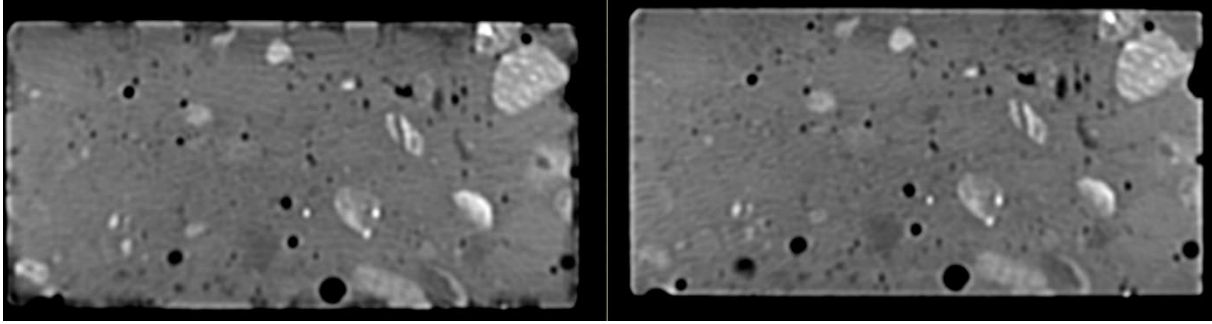
10. kép: Az S3/1 próbatestről készített CT vizsgálat vizualizált képe (Geosoft Számítástechnika Bt.), balra a kezelt próbatest, jobbra a kezeletlen próbatest



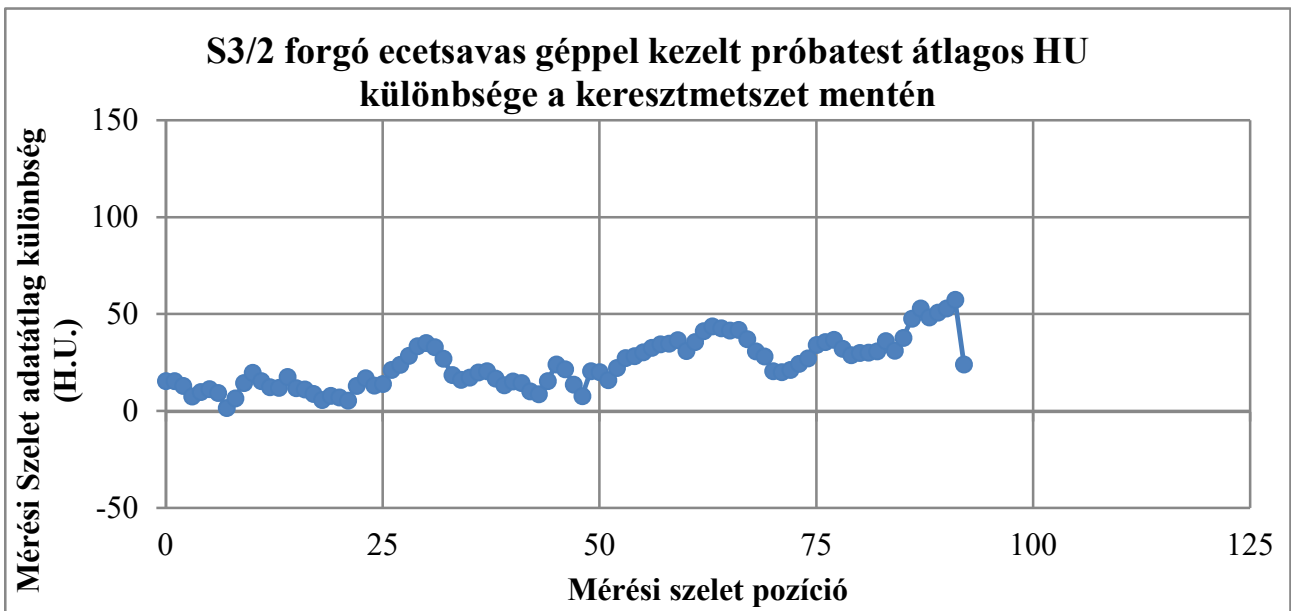
9. ábra: Az S3/1 próbatest átlagos HU eltérése a kezelés előtt és után (Geosoft Számítástechnika Bt.)



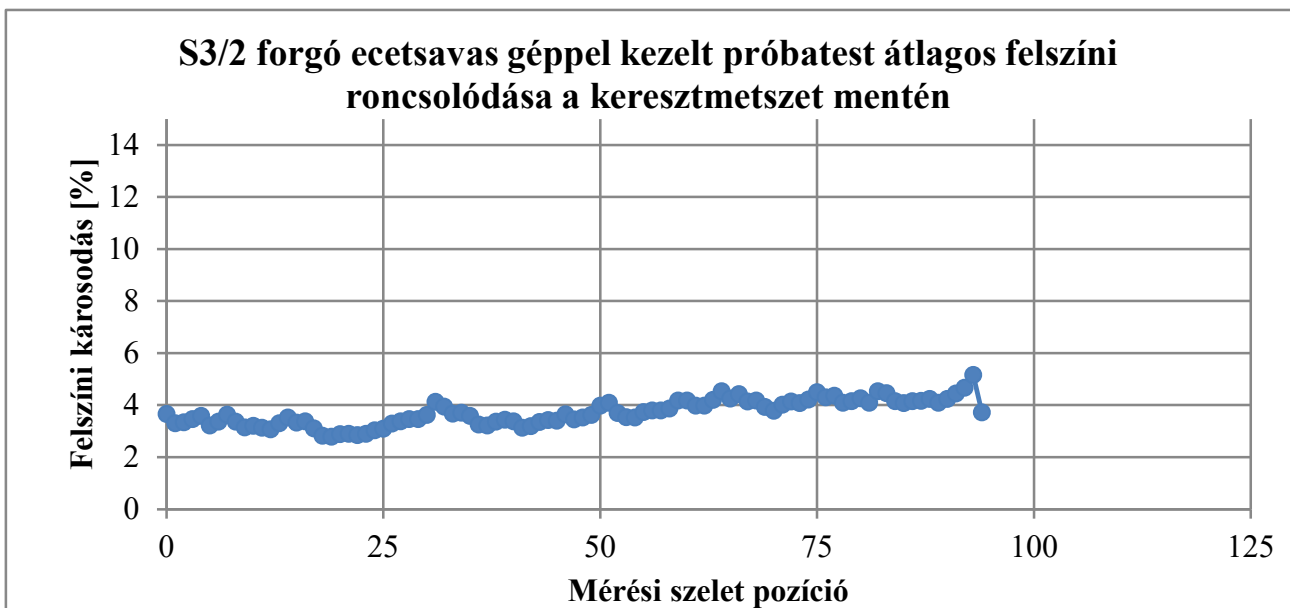
10. ábra: Az S3/1 próbatest átlagos felszíni károsodása kezelés után (Geosoft Számítástechnika Bt.)



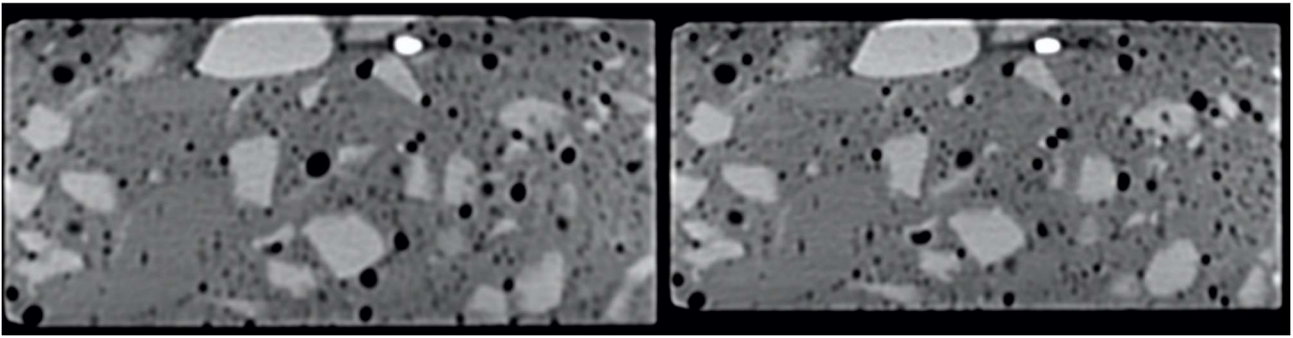
11. kép Az S3/2 próbatestről készített CT vizsgálat vizualizált képe (Geosoft Számítástechnika Bt.), balra a kezelt próbatest, jobbra a kezeletlen próbatest



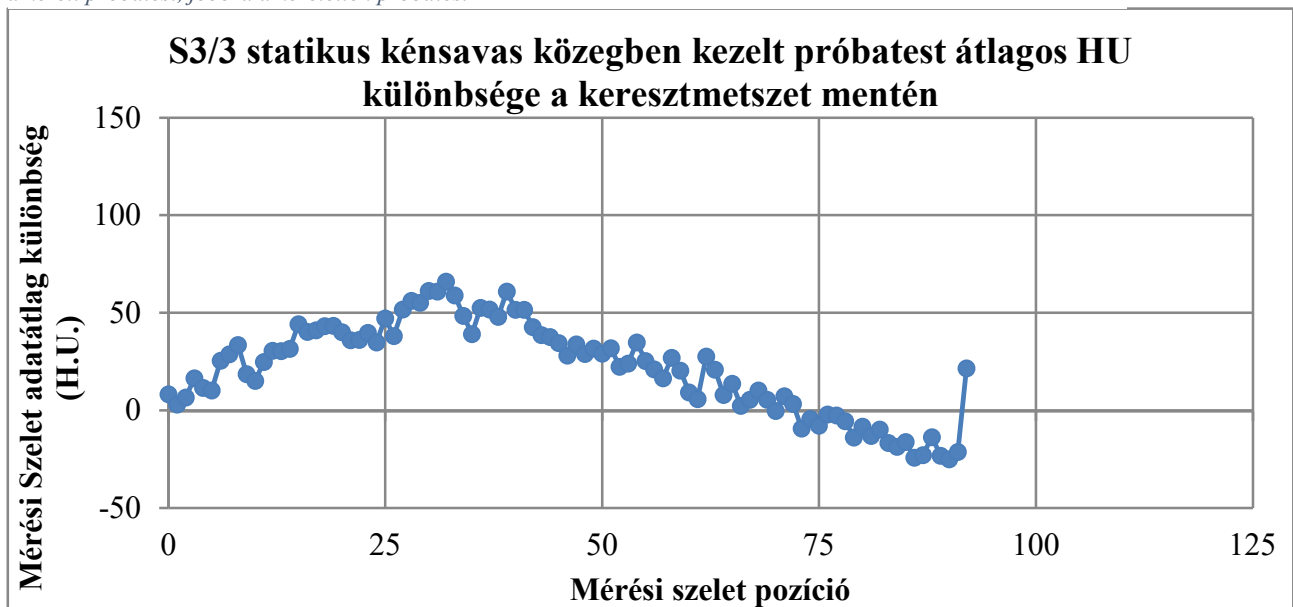
11. ábra: Az S3/2 próbatest átlagos HU eltérése a kezelés előtt és után (Geosoft Számítástechnika Bt.)



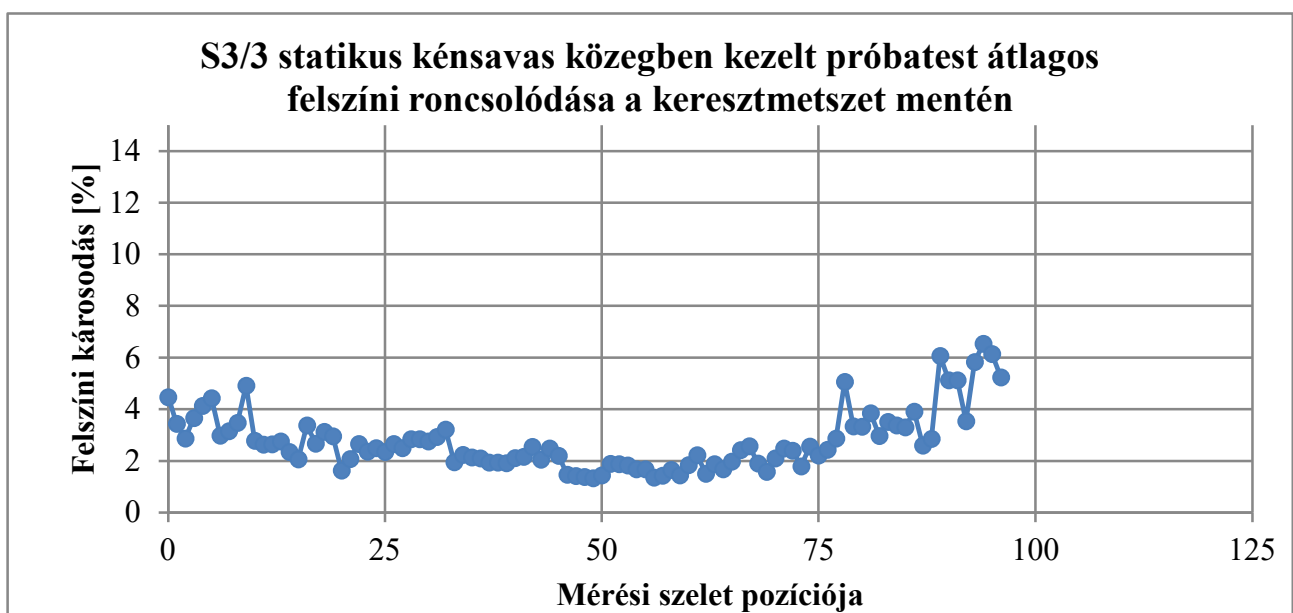
12. ábra: Az S3/2 próbatest átlagos felszíni károsodása kezelés után (Geosoft Számítástechnika Bt.)



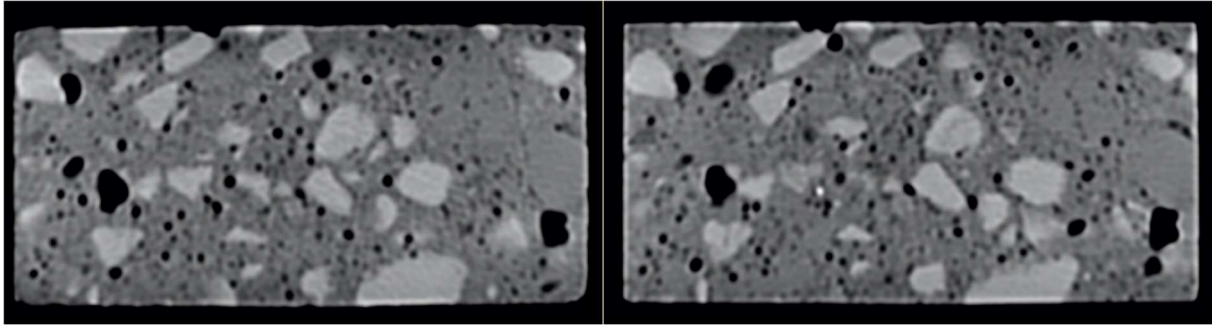
12. kép: Az S3/3 próbatestről készített CT vizsgálat vizualizált képe (Geosoft Számítástechnika Bt.), balra a kezelt próbatest, jobbra a kezeletlen próbatest



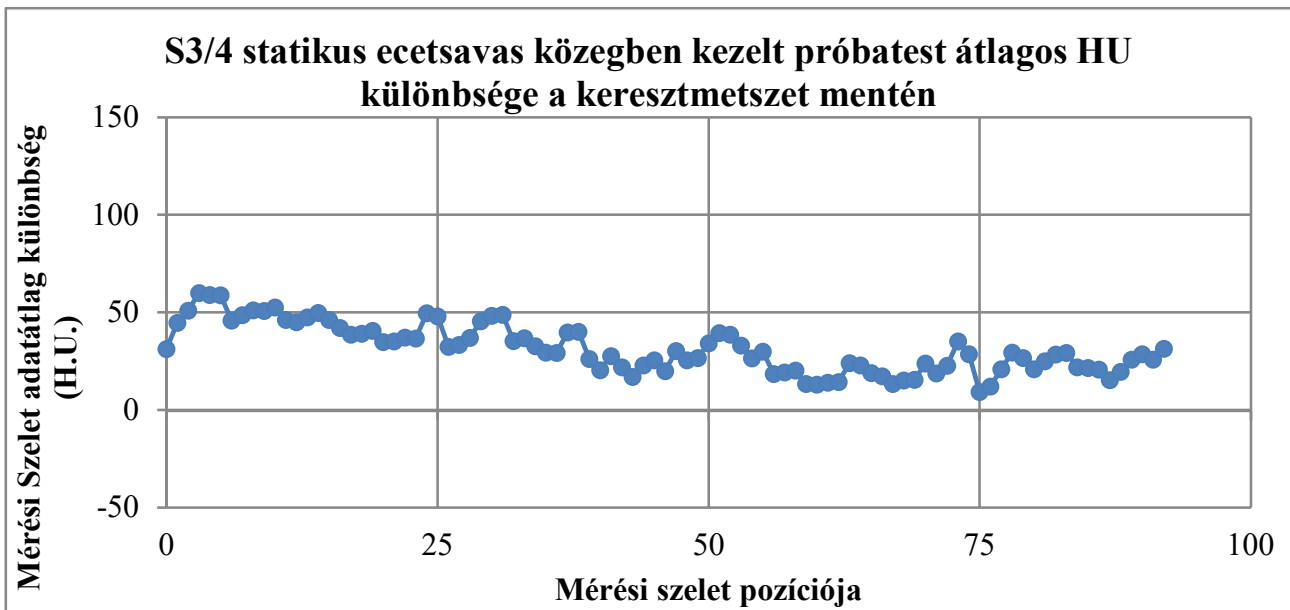
14. ábra: Az S3/3 próbatest átlagos HU eltérése a kezelés előtt és után (Geosoft Számítástechnika Bt.)



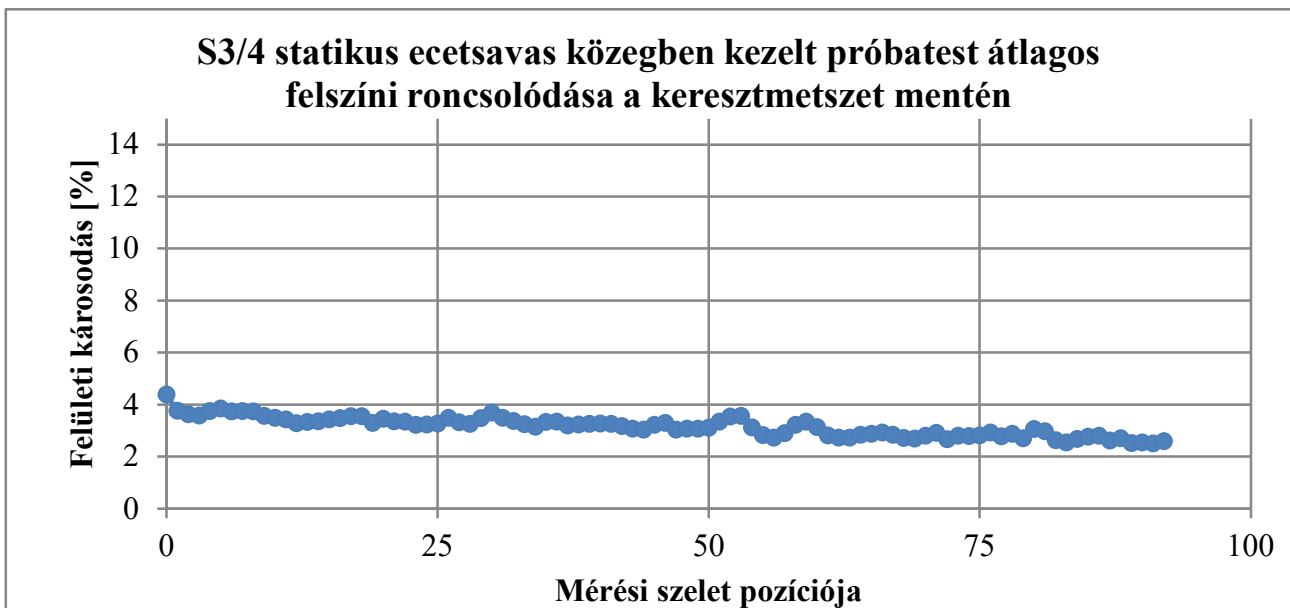
13. ábra: Az S3/3 próbatest átlagos felszíni károsodása kezelés után (Geosoft Számítástechnika Bt.)



13. kép: Az S3/4 próbatestről készített CT vizsgálat vizualizált képe (Geosoft Számítástechnika Bt.)



16. ábra: Az S3/4 próbatest átlagos HU eltérése a kezelés előtt és után (Geosoft Számítástechnika Bt.)



15. ábra: Az S3/4 próbatest átlagos felszíni károsodása kezelés után (Geosoft Számítástechnika Bt.)

Minta megnevezése	Kezelés típusa	Átlagos eltérések, HU	Felszíni eltérések a próbatestek keresztmetszetének %-ában
S3/1	kénsavas forgógépes kezelés, 6 hét	25	3,71
S3/2	ecetsavas forgógépes kezelés, 6 hét	24	3,7
S3/3	kénsavas statikus kezelés, 12 hét	67	5,3
S3/4	ecetsavas statikus kezelés, 12 hét	32	3,15

4. táblázat: A CT mérések átlag értékeinek összefoglaló táblázata

Az önkényes HU skálát a levegő és a víz HU értékével határozták meg, amelynek CT értéke -1000 HU, míg a víz CT értéke 0 HU. A nagyobb átlagos eltérés értékek a nagyobb denzitás különbséget mutatják, a kezelés előtt és kezelést követő CT vizsgálat eredményeképpen, míg felszíni eltérések a behatolási zónára vastagságára engednek következtetni. A kénsavas forgógépes módszernél az erős abrázio hatására a behatolási zóna kisebbnek adódik a felszíni eltérések próbatestek keresztmetszetének %-ában megadott értékei alapján. A fellazult zóna maga is koptató hatásnak van kitéve, folyamatosan fogy, illetve a pórusok a SEM felvételek alapján erősen kitöltöttek gipsz kristályokkal, míg ez a statikus esetben nem volt megfigyelhető. Az ecetsav hatására %-osan megadott értékeket szükséges a többi eredmény birtokában tovább elemezni.

5.4 SEM-vizsgálat

Míg a pH=1,5 kénsavas közeg jelentős mennyiségű gipszesedést hozott létre (14-15. képek, T1/T forgógépes minta), addig a pH=3,5 esetében ez a gipszesedés nem figyelhető meg, helyette a monoszulfát → másodlagos ettringit képződés figyelhető meg (17-19. képek, T4/T fűvókás savkorróziós minta).

A T1/T forgógépes minta kezelt felülettől távolabb eső rétegeiben szintén a monoszulfát → másodlagos ettringit képződés figyelhető meg (16. kép).

A T4/T fűvókás minta kezelt felülettől távolabb eső rétegeiben szintén a monoszulfát jelenléte dominál (19. kép).

A tömött gipszréteg lassíthatja a behatolási reakciót (diffúzió vezérelt folyamat), de ennek az alapos alátámasztása még további vizsgálatokat igényel.

Jelenség	T1/T	T4/T
gipszképződés	igen	nem
másodlagos ettringit képződés	igen, kezelt felülettől távolabb	igen, kezelt felülethez közelebb
monoszulfát jelenléte	igen, kezelt felülettől távolabb	igen, kezelt felülettől távolabb

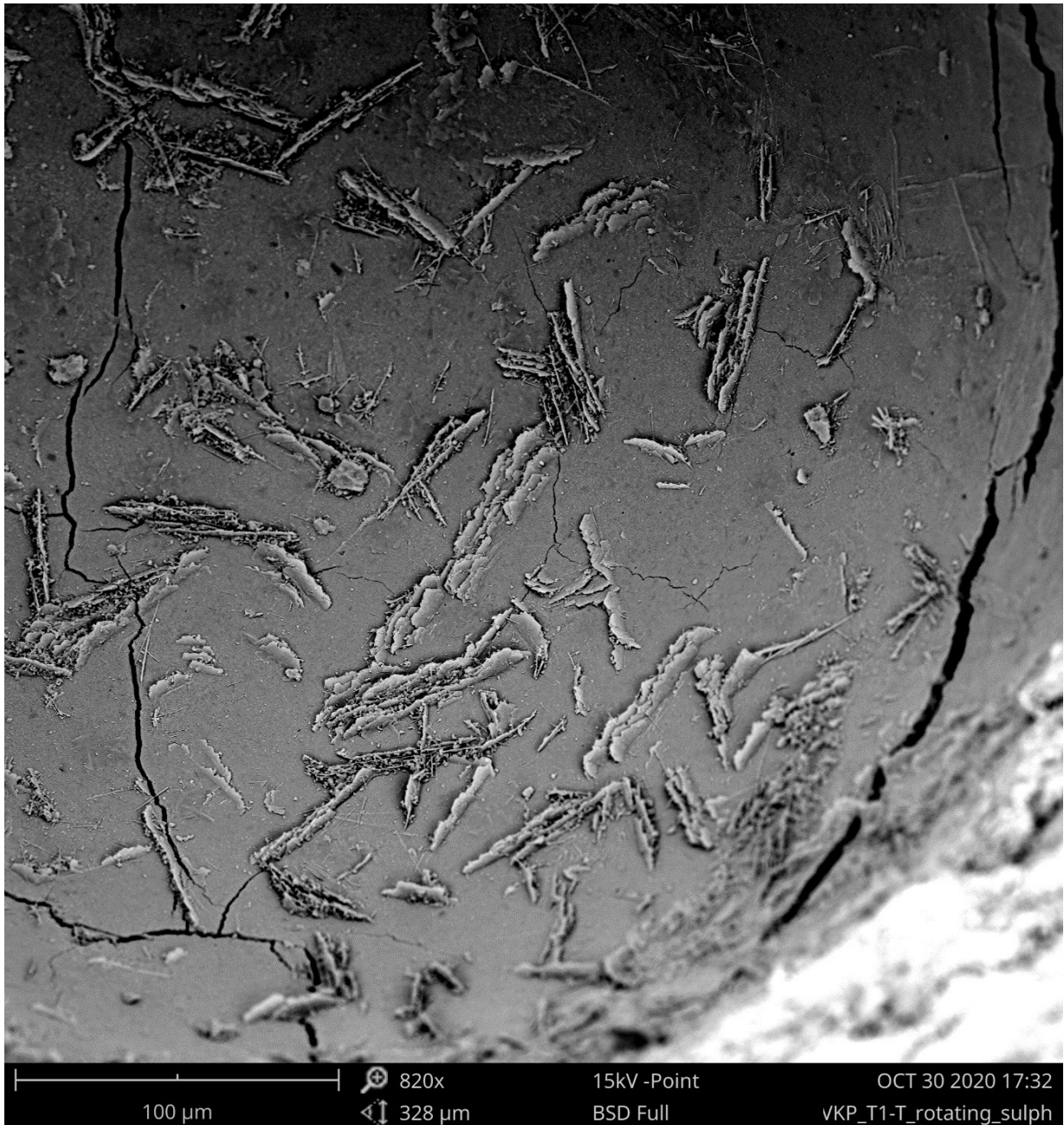
5. táblázat: Az elektronmikroszkóppal végzett megfigyelések összefoglaló táblázata



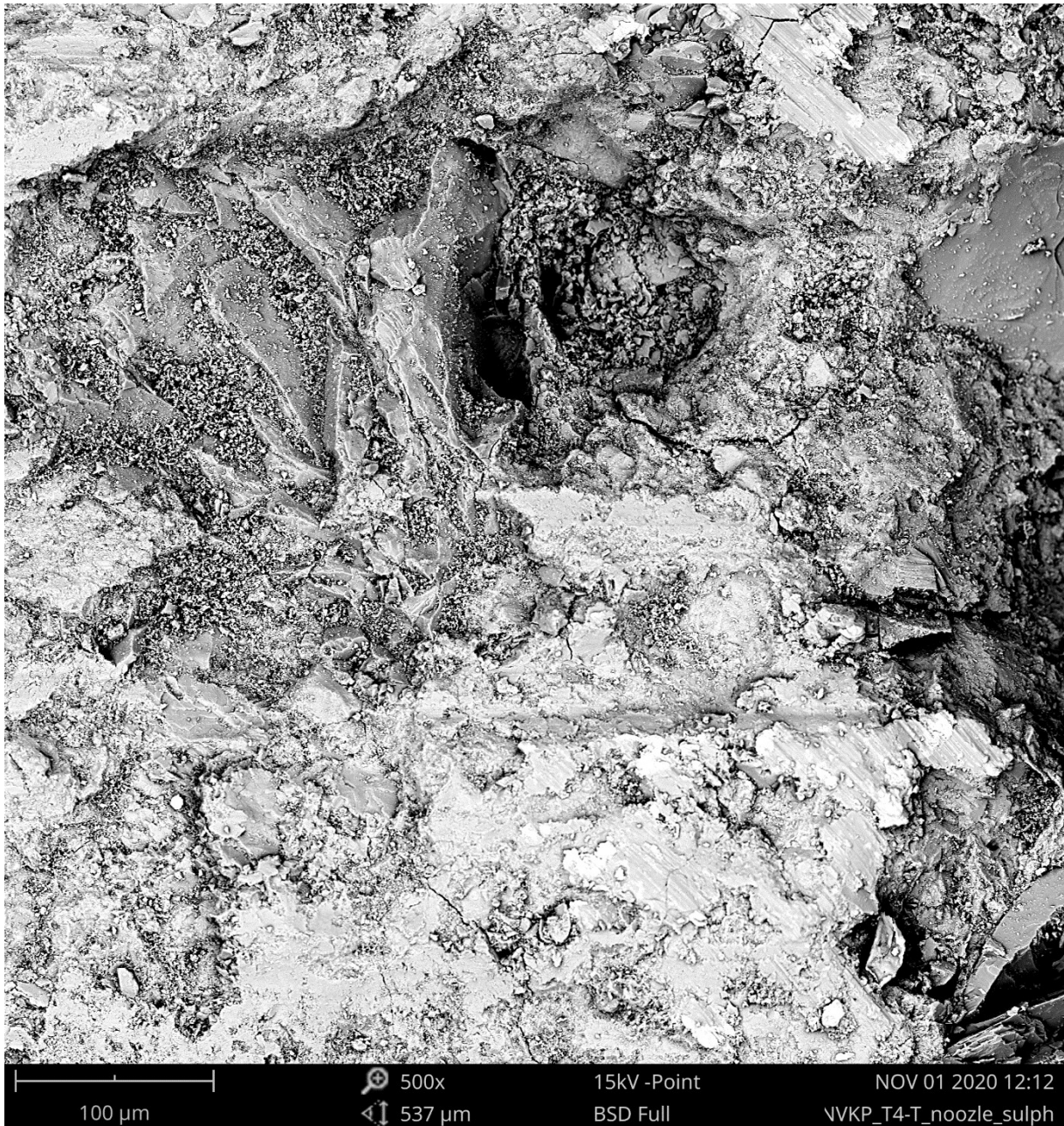
14. kép: A T1/T betonminta SEM felvétele, kénsavas forgógépes kezelést követően: a kezelés hatására gipszkristályok keletkeztek a kezelt felülethez közeli pórusokban



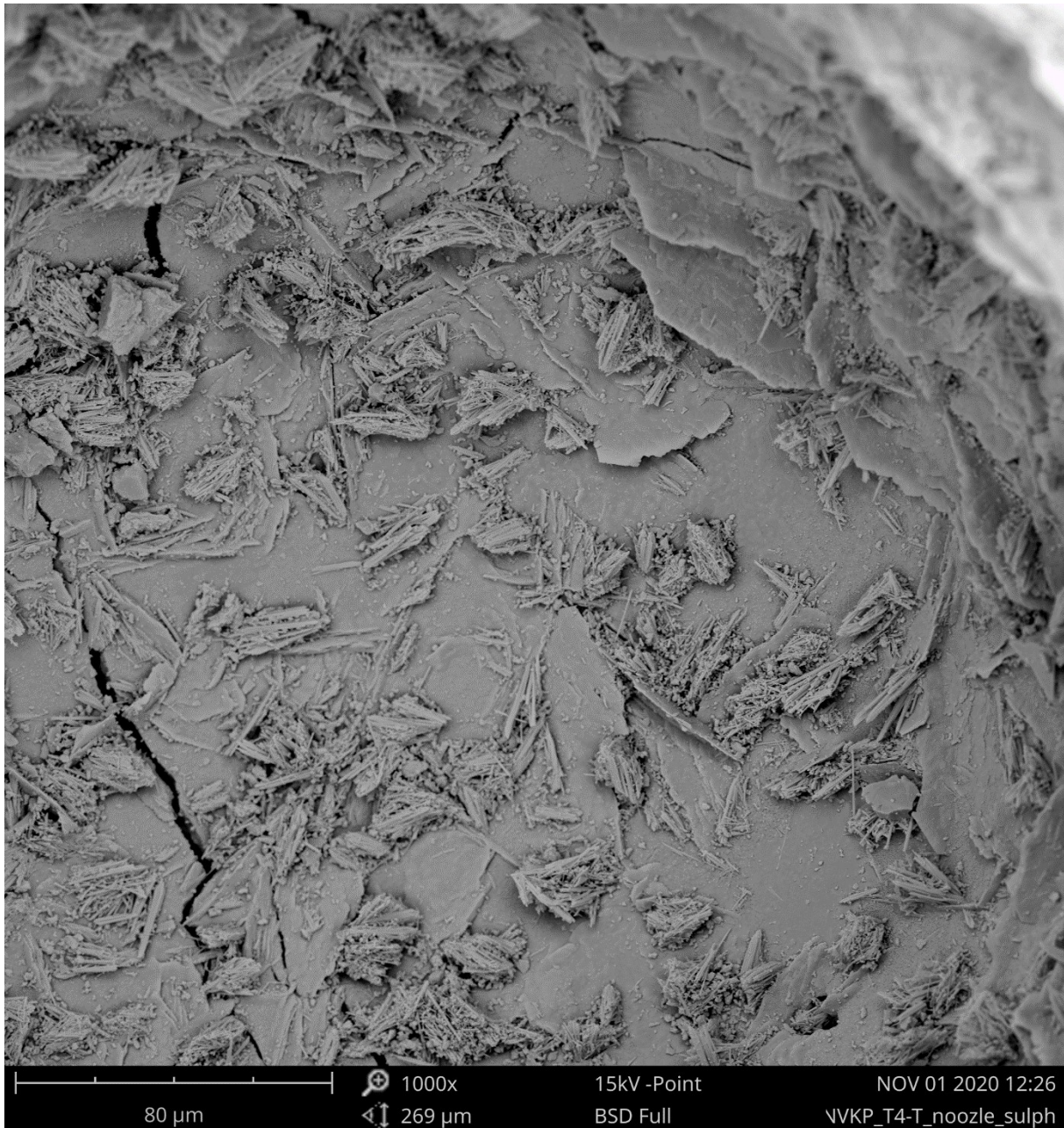
15. kép: A T1/T betonminta SEM felvétele, kénsavas forgógépes kezelést követően, a kezelt felületről néhány mm mélységben: az apró gipsz kristályokkal tömött szövetszerkezet



16. kép: A T1/T betonminta SEM felvétele: monoszulfát kristályok és zsugorodási repedések a pórus belső felületén



17. kép: A T4/T betonminta a savsugaras (fűvókás) gépi kezelést követően, a SEM vizsgálatra kiválasztott felületközeli területen. Gipszesedés nyoma nem tapasztalható.



18. kép: A T4/T betonminta a savsugaras (fűvókás) gépi kezelést követően, pórus a SEM vizsgálatra kiválasztott helyen: ettringit és monoszulfát kristályok halmaza a prós belső felületén



19. kép: A T4/T betonminta a savsugaras (fűvókás) gépi kezelést követően, elsősorban ettringit tűkristályok a pórusok belső felületén

6 Következtetések

6.1 A vizsgálati módszerek értékelése

6.1.1 Statikus nem abrúziós vizsgálat

Ezen vizsgálati módszert egyszerűsége folytán több korábbi kísérletben is felhasználták, mivel nem igényel gépesítést és így karbantartást sem. Azonban a vizsgálat időtartama hosszú, és az ezen idő alatt végbement változások mértéke nehezebbé teszi a megbízható adatszerzést. A savak koncentrációjának növelésével gyorsítható a folyamat, ami az adatok egyszerűbb kinyerését jelenti, így kedvezőbb lesz az eljárás. Mivel egy fedhető tároló tárgyon kívül nem igényel egyebet a vizsgálat megkezdése, ezen módszer akkor alkalmazandó, amennyiben igen nagy mennyiségű próbatest vizsgálatát kell egyidejűleg végrehajtani, vagy amennyiben nem áll rendelkezésre más.

6.1.2 Statikus abrúziós vizsgálat

A statikus nem abrúziós vizsgálatokhoz képest kismértékű, de mérhető különbséget szolgáltatottak ezek a vizsgálatok. Az ecetsavval kezelt próbatestek esetén ez a különbség jobban kimutatható volt. Mindezek ellenére a vizsgált abrúziós hatás modellezése szempontjából a módszer hagy kívánnivalót, a hetente egyszer történő abrúziós hatás kevés valós környezetet szimulálhat megfelelően, valamint az abrúzió hatása számszerűen kicsiny, így annak mérése kevésbé megbízható. Ezek mellett, figyelembe véve a vizsgálat hosszabb időtartamát, valamint a nem abrúziós vizsgálatokhoz képest kimutatható eltérés kis mértékét, a vizsgálatot egyéb abrúziós vizsgálatokkal egyidejűleg nem érdemes elvégezni. Amennyiben nem áll rendelkezésre más módszer az abrúziós hatás megfigyelésére, a módszer alkalmazható, ám ennek érdekében célszerű lehet további kísérleteket végezni. A savak koncentrációjának változtatása mellett érdemes lehet megfigyelni a felületi abrúzió gyakoriságának hatását is a vizsgálati eredményekre.

6.1.3 Forgógépes vizsgálat

A forgó gépekkel végzett vizsgálatok eredményei voltak a legkiemelkedőbbek mind a kénsavas, mind az ecetsavas kezelések esetén. Az eljárás csupán hat hét alatt jelentősebb változást okozott így jelentősen gyorsítva a vizsgálat teljes időigényét is. A gépezet karbantartása és tisztítása nem vett csupán pár órát igénybe, míg kezelése és újratöltése egyszerű volt. A jelentősebb leromlás eredményeként az ezen berendezésekkel vizsgált

próbatesteket több mérési módszerrel is könnyebb volt mérni, mint a statikus esetekben (behatolás vizsgálata, CT vizsgálat).

Mivel a berendezés gépi utón végzi a próbatestek abrázíóját, azt megbízhatóbban és konzisztensebben hajtja végre mintha azt manuálisan tennék. További előnye lehet a gépesítésnek, hogy tovább fejleszthető a készülék, automatikus savkoncentráció szabályzás vagy pH mérés mind olyan bővítései lehetnek a vizsgálatnak, amelyek segítik annak elvégzését vagy több adatot szolgáltatnak.

Amennyiben nagyobb mennyiségű minta, vizsgálata vagy ipari felhasználás szükséges, ezen eljárás csökkenti azok elvégzésének idő igényét, valamint megbízhatóbb eredményt szolgáltat. A kialakításból adódóan az abrázíós hatás jól szimulál több olyan helyszínt, ahol a legtöbb beton savkorrózió szokott előfordulni, a legtöbb kért okozva. Összességében a legeredményesebb eljárás, ami alkalmas gyorsított tesztek elvégzésére, nem bonyolultabb vagy időigényesebb mint a manuális vizsgálatok és tovább fejleszthető.

6.1.4 Folyadéksugaras gépes vizsgálat

A folyadéksugaras gépből sajnos csak egy darab készült el a mai napig, így csak egy sával volt alkalmunk megvizsgálni a próbatesteket. Ez nem elegendő ahhoz, hogy teljes képet kapjunk annak teljesítéséről. A kénsavas vizsgálatok alapján megfigyelhető volt, hogy az abrázíós hatás miatt jelentősebb korrózió tudott végbe menni, mint a statikus vizsgálatok alatt, ám ez csak 12 hét alatt volt elérhető. Az eljárás az áramló folyadékba mártott műtárgyak környezetét jól modellezi, így hosszabb távú, valóságközeli vizsgálatokhoz előnyös lehet a berendezés használata.

Annak érdekében, hogy a gépet gyorsított vizsgálatokhoz is alkalmazni lehessen, további kísérletekre van szükség. Érdemes lenne ecetsavval és töményebb kénsavval is elvégezni a vizsgálatot és tanulmányozni, valamint összehasonlítani ezek eredményeit a már meglévő eredményekkel. A forgó gépes vizsgálatához hasonlóan ezt is lehetne bővíteni pH méréssel vagy automatikus koncentráció szabályzással. Az utóbbi még hasznosabb lenne, mint a forgó gép esetében a hosszú távú vizsgálatok esetén. Összességében a folyadéksugaras berendezés még további kísérletezést igényel, hogy eldönthető milyen vizsgálatokhoz alkalmas használata. Jelen adataink alapján hosszán tartó vizsgálatokhoz tartjuk legalkalmasabbnak.

6.1.5 Általános észrevételek

A kénsavas vizsgálatok terén a 3.5-ös pH-jú vizsgálatok hatékonysága alulmaradt az 1.5-ös pH-val végzett forgó savgéphez képest. A vizsgálatok időigényességének csökkentése érdekében érdemes lehet elvégezni kísérleteket alacsonyabb pH-val mindkét sav esetében.

A statikus vizsgálatok hatékonyságának növelését el lehetne érni más formájú próbatestekkel is, amelyeknek térfogat/felület aránya kisebb. Ez lehetővé tenné a pontosabb mérést, de kérdéseket vet fel egyes mérési módszerek alkalmazhatóságával kapcsolatban (méret korlátok CT vizsgálatnál, elhasíthatóság behatolás vizsgálatához).

Azon vizsgálatok esetén, ahol a teljes savoldatot lecseréltük hetente az ezzel eltöltött idő jelentősen több volt, mint a folyadéksugaras berendezésnél, amelynél csak állítottunk a sav pH-ján. Érdemes lehet kísérletet végezni a teljes oldat cserélésével és az annak pH-állításával végzett vizsgálatok közti eltérés megfigyelésére. Amennyiben a pH állítás hasonlóan megfelelőnek mutatkozik, érdemes lehet azzal végezni a vizsgálatokat, időtakarékoság szempontjából.

6.2 A mérési módszerek értékelése

6.2.1 Tömegmérés

A tömegmérés gyors, roncsolásmentes, így többször és bármikor elvégezhető, ami alkalmassá teszi a próbatestek mérésére a korróziós folyamat alatt is. Az így kapott eredmény bár alkalmas a kémiai ellenálló képesség értékelésére, azonban önmagában nem reprezentálja megfelelően a korróziót. Így javaslataink között szerepel, hogy a korrózió által okozott romlást nem tanácsos kizárólag tömegmérés alapján meghatározni. A módszert így együtt használandó más mérésekkel, amelyek kiegészítik a korrózió mértékéről és módjáról alkotott képet. Az ismételhetségének köszönhetően azonban igen hasznos elvégezni a mérést minden esetben, mivel könnyen kimutathatók vele a folyamatok időbeli tendenciái.

A tömeget tized grammos pontossággal ajánljuk mérni mivel ennél kisebb tömegváltozások a próbatestek szobahőmérsékleten száradása során bekövetkezhetnek. A tömeg változását – mivel nagyban befolyásolja a próbatest kiindulási felülete – ajánljuk arányosítani valamilyen értékkel (vonatkoztatni valamire). Összességében hasznos mérés, amit érdemes minden vizsgálat alatt elvégezni, mivel gyors, nem roncsolásos és kimutatja az időbeli tendenciákat, azonban nem használható kizárólagos adatforrásként.

6.2.2 Behatolás tanulmányozása fenolftaleinnel

A módszer olcsó és könnyen elvégezhető, így alkalmas nagyobb mennyiségű minta adatainak feldolgozására is. Azonban, mivel a mérés a minta elhasítását igényli, csak nagy mennyiségű minta birtokában lehetséges a korróziós folyamat több fázisát vizsgálni. Ezen kívül a tömegméréshez hasonlóan a kinyert adat nem reprezentálja megfelelően a korróziót, így nem használható önmagában az ellenállóképesség meghatározására. A megfigyelésen kívül mérhető a behatolási mélység konkrét értéke, amellyel a módszer értékesebb adatokat szolgáltat, azonban erre az általunk elérhető eszköz használata során nem volt lehetőségünk.

Amennyiben tömegméréssel együtt kerül alkalmazásra, megfelelően kiegészíti azt, figyelembe véve a korrózió egy olyan aspektusát, amelynek mérésére az nem alkalmas. Mikroszkópos megfigyeléssel tanulmányozható a behatolási front és könnyebben megállapítható, mely esetekben érdemes átfogóbb elemzést végezni. Összességében hasznos mérési módszer, amit, amennyiben van rá lehetőség, érdemes lehet elvégezni, mivel nem idő- vagy erőforrás igényes, és hasznos információval szolgál a korrózió hatásaival kapcsolatban. Ezen kívül látványos is. Egyéb vizsgálat biztosíthat hasonló adatot, amely esetekben használata redundáns. A vizsgálat alapján elvégzett előválogatás alapján kiválasztott mintákon érdemes közzétani vékonycsiszolatokat készíteni, és azokon tovább tanulmányozni a behatolási frontokat. Ez azonban már egy költségesebb és időigényesebb módszer.

6.2.3 Pásztázó elektronmikroszkópia

A pásztázó elektronmikroszkópia az egyik legpontosabb, és legalaposabb módszer, amivel egy próbatestet vizsgálni tudunk. Alkalmas a beton szövetének beható vizsgálatára, az egyes részek elemi összetételének meghatározására, és így a korróziós folyamatok tanulmányozására. Azonban a vizsgálati technika korlátai és jellegzetességei miatt, kizárólag roncsolásos módon alkalmazható, a vizsgálat és a mintaelőkészítés költséges és időigényes. A vizsgálatot csak az ahhoz megfelelően értő személy tudja jól elvégezni, de így is időigényes. Ugyan pontos adatokat szolgáltat a beton belső szerkezetéről, de azokat nehéz összevetni másik minták vizsgálati eredményeivel, az adatok nehezen számszerűsíthetők.

Bár ez a mérés adja a legtöbb információt, annak hasznossága csak más adatok ismeretében helyezhető megfelelő kontextusba. Idő- és erőforrás igénye miatt, csak más mérésekkel együtt, azok alapján vizsgálatra érdemesnek ítélt próbatesteken javasolt elvégezni, megfelelő átgondolást követően. Összességében a pásztázó elektronmikroszkópia csak speciális esetek pontosabb elemzésére alkalmazható, és akkor is fontos más adatokkal együtt

használni. Szabványosított vizsgálatokhoz, amelyeket az ipar kiszolgálására végeznek, nem szerencsés használni, azonban új anyagok, kutatások során felmerülő kísérleti vagy kérdéses eredmények beható tanulmányozására rendkívül hasznos.

6.2.4 CT vizsgálat

A CT vizsgálattal tanulmányozható a próbatestek belseje roncsolásmentesen, és a vizsgálat adatot szolgáltat a behatolásról, a pórusrendszerrel, valamint a felszín állapotáról is. A mérés elvégzéséhez – az elektronmikroszkópiához hasonlóan, szükséges költséges berendezések rendelkezésre állása – valamint a vizsgálatához értő személy. Mivel a vizsgálatot nem magunk végeztük, annak folyamatairól nem tudunk véleményt alkotni, ám egy-egy próbatest csoport vizsgálata nem vesz néhány óránál több időt igénybe. A próbatesteket általában reggel szállították el mérésre, és délután már visszaérkeztek. Ugyanakkor a beton vizsgálatára alkalmas beállítások és kalibrációk jelentős tapasztalatot igényelnek és időigényesek.

Bár a CT-vel végzett mérések a betonok vizsgálatában még mindig újdonságnak számítanak, a vizsgálati eredményeket a CT-ben jártas szakember elemezte, a módszer önmagában használhatóságáról nem tudunk megfelelően megalapozott véleményt alkotni. A vizsgálati eredmények alapján a vizsgálatot hasznos kiegészítő értékelésnek tekinthető a korróziós jelenségek leírásában. Összességében a CT-vel végzett mérésekkel kapcsolatban – a módszer számunkra nem ismert részletei miatt – nem tartjuk helyén valónak ezen dolgozatban megítélni annak használhatóságát a kémiai korrózió megítélésében, azonban hasznos része lehet a vizsgálatoknak a jövőben, mivel elvégezhető a korróziós vizsgálatok közben is, ezzel lehetőséget nyitva az időbeli folyamatok egyszerűbb és pontosabb megfigyelésére.

7 Összefoglalás

Kísérletsorozatunk célja volt a betonok kémiai ellenállóképességének meghatározására létrehozott vizsgálatok, és az azok eredményességét mérő módszerek megismerése. Ennek érdekében létrehoztunk olyan vizsgálati módszereket, amelyeken tanulmányozható volt több paraméter hatása is a vizsgálatokra nézve, és ezek alapján el tudtuk dönteni, mely vizsgálatokat mire érdemes használni. Ezen kívül több mérési módszert is alkalmaztunk, hogy eldönthessük melyek alkalmazása, milyen esetekben lehet célszerű. Összefoglalva a következőket tapasztaltuk:

- Elmondhatjuk, hogy az abrázios hatás és a sav koncentrációjának növelése jelentősen gyorsíthatják a vizsgálatokat, ezzel alkalmasabbá téve őket az ipari felhasználásra.
- A statikus vizsgálataink általánosan kisebb változásokat mutattak, mint a gép vizsgálatok, így ezeknél érdemes lehet a sav koncentrációt vagy a kontakt felületet növelni.
- A kézzel végzett abrázios vizsgálatok eredményessége alul maradt a gépek által végzettekkel szemben, így ezen vizsgálatokat kevésbé tartjuk alkalmasnak még a viszonylag hosszúnak tűnő, 12 hetes vizsgálati időtartam esetében is.
- A forgó savkorróziós készülékekkel végzett vizsgálatok voltak a leggyorsabban elvégezhetőek, a legjobban mérhető eredményekkel, míg a folyadéksugaras készülékkel végzett vizsgálat további kísérleteket igényel. Jelen adatok szerint utóbbit hosszú távú vizsgálatokhoz, valamint a savkorrózió modellezéséhez adatgyűjtésre javasoljuk.
- A tömegváltozást, valamint a behatolási front vizsgálatát egyszerűségük és gyorsaságuk miatt alkalmasnak tartjuk ipari használatra, ám meg kell jegyezni, hogy egyik sem megbízható önmagában.
- Az elektronmikroszkópiát idő- és szakképzett munkaerő igénye, valamint költségessége miatt csak kutatási célokra ajánljuk.
- A CT-vel végzett vizsgálatok a betonok vizsgálatában még mindig újdonságnak számítanak. A módszer önmagában használhatóságáról nem tudtunk megfelelően megalapozott véleményt alkotni. A vizsgálati eredmények alapján a vizsgálatot hasznos kiegészítő értékelésnek tekinthetjük a korróziós jelenségek leírásában. Összességében a CT-vel végzett vizsgálatok hasznos kiegészítői

lehetnek a savkorróziós vizsgálatoknak a jövőben, mivel elvégezhetők a korróziós vizsgálatok közben is, ezzel lehetőséget nyitva az időbeli folyamatok egyszerűbb és pontosabb megfigyelésére.

Köszönetnyilvánítás:

Szeretnék köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés Tanszéknek, hogy kísérleteimhez a szükséges laboratóriumi és személyi háttérrel biztosította. Köszönetet mondok Rónaki Viktóriának, Kovács Marcellnak, Szijártó Annának és Salem G Nehme-nek.

Köszönetet mondok továbbá az NVKP_16-1-2016- 0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózió ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Kopecskó Katalinnak és Dr. Balázs L. Györgynek, akik a kísérleti munka és a konzultációink során hasznos tanácsokkal láttak el.

Köszönettel,

Somlai Bálint

8 Forrásjegyzék:

- Erika Dawn Weber (2005) Testing procedure for assessing the resistance of specimens to sulfuric acid attack, MSc Diploma, Brigham Young University
- 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.]
- 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,]
- Kopecskó Katalin, Balázs L. György (2019) Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) alkalmazása építőmérnöki gyakorlatban. Ebben: Köllő Gábor (ed.), *XXII Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*, Csíksomlyó, Erdélyi Magysr Műszaki Tudományos Társaság.
- 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
- Mark Alexander, Alexandra Berton & Nele De Belie ed. (2013) *Performance of Cement-Based Materials in Agressive Aqueous Environments, RILEM State-of-the-Art Reports 10. kötet*, Cape Town, RILEM
- 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.
- 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.]
- Elke Vincke, Steven Verstichel, Joke Monteny és Willy Verstraete (1999) A new procedure for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete, *Biodegradation*, 10, pp. 421-428 Elérhető:

<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008309320957#citeas> [Letöltés ideje: 2020.08.09.]

- Ma.Guadalupe D. Gutierrez-Padilla, Angela Bielefeldt, Serguei Ovtchinnikov, John Pellegrino, Joann Silverstein (2009) Simple scanner-based image analysis for corrosion testing: Concrete application, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp. 51-57 Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360800085X> [Letöltés ideje: 2020.08.09.]
- Éva Lublós, Kristóf Kapitány, György L. Balázs, Tamás Földes, Viktor Hlavička, Lili Hlavicka-Laczák (2019) CT and laboratory test of the wall panels after fire load, *construction and Building Materials*, 211, pp. 1105-1116 Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181930635X> [Letöltés: 2020.10.16.]
- 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.]
- 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.]
- N. De Belie (2008) Evaluation of methods for testing concrete degradation in aggressive solutions Ebben: Nele De Belile (ed.), *Workshop on Performance of Cement-based Materials in Aggressive Aqueous Environments - Characterisation, Modelling, Test Methods and Engineering Aspects*, RILEM Publications SARL, pp. 79-90
- Vági István (2018) *Előre gyártott saválló betonok fokozása puccolános kiegészítőanyagokkal*, MSc diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem