

## A beton savkorróziós ellenállásának fokozása

### Increasing the acid corrosion resistance of concrete

*Dr. KOPECSKÓ Katalin, egyetemi docens<sup>1</sup>,  
KHAIQANI, Zaid A.A., PhD hallgató<sup>2</sup>  
AL-ASKARY, Ali Satar Jaber, PhD hallgató<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

<sup>2</sup>BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

<sup>1</sup>E-mail: kopecsko.katalin@emk.bme.hu Tel: (36-1) 463-2238, Fax: (36-1) 463-2017

<http://gmt.bme.hu/>

#### Abstract

*The resistance of concrete to acid corrosion is governed by the combined effects of binder composition, pore structure, water-to-binder ratio, curing conditions, and the type of acidic environment. Portland cement-based concretes cannot be regarded as chemically inert or inherently acid-resistant materials under acidic exposure; therefore, the primary objective in practice is to slow down deterioration processes and extend service life. Important approaches for improving acid resistance include reducing the calcium hydroxide content of the cement matrix, refining the pore structure, decreasing permeability, and incorporating suitable supplementary cementitious materials. However, the effectiveness of different binder combinations depends strongly on the acid type, replacement ratio, exposure duration, and test methodology. This paper reviews the principal mechanisms of acid corrosion, discusses possible strategies for optimizing concrete composition, and highlights that resistance to acid attack does not necessarily correlate directly with resistance to chloride ion penetration, since the governing chemical and transport mechanisms are fundamentally different.*

**Keywords:** concrete corrosion, chemical resistance, supplementary cementitious materials, geopolymer, chloride ion migration, durability

#### Kivonat

*A beton savkorrózióval szembeni ellenállóképességét a kötőanyag összetétele, a pórusszerkezet, a víz-kötőanyag tényező, az utókezelés, valamint a savas közeg típusa együttesen határozza meg. A portlandcement alapú betonok savas környezetben nem tekinthetők ellenálló, inert anyagnak, ezért a gyakorlati alkalmazásban a cél a károsodási folyamat lassítása és a szerkezet élettartamának növelése. A savállóság fokozásának fontos eszközei a kalcium-hidroxid tartalom csökkentése, a pórusrendszer finomítása, a permeabilitás mérséklése, továbbá megfelelő cementkiegészítő anyagok – például metakaolin, szilikapor, pernye és kohósalak – alkalmazása. A különböző kötőanyag-kombinációk hatása azonban savtípustól, adagolástól és a vizsgálati módszertől is függ. A cikk áttekinti a savkorrózió fő mechanizmusait, a betonösszetétel optimalizálásának lehetőségeit, valamint rámutat arra, hogy a savállóság és a kloridion-behatolással szembeni ellenállás között nem feltétlenül áll fenn közvetlen összefüggés.*

**Kulcsszavak:** savkorrózió, vegyi ellenállóképesség, cementkiegészítő anyagok, geopolimer, kloridion-migráció, tartósság

## 1. BEVEZETÉS

A beton tartósságának kérdése a vasbeton szerkezetek élettartam-tervezésének egyik központi témája. A hagyományos tartóssági problémák – karbonátosodás, kloridion-behatolás, fagy- és sóállóság, szulfátkorrózió – mellett számos létesítményben savas kémiai igénybevétellel is számolni kell. Ilyen környezet fordulhat elő szennyvízcsatornáknál és szennyvíztisztító műtárgyakban, mezőgazdasági és élelmiszeripari üzemekben, biogáz-létesítményekben, ipari padlóknál, vegyipari tárolók környezetében, silókban, trágyatárolókban, állattartó telepeken, valamint olyan előregyártott vasbeton elemeknél, amelyek agresszív

vizekkel, gázokkal vagy szerves savakkal érintkeznek. A beton savas közegekkel szembeni ellenállása azért különösen összetett kérdés, mert a savak nem csupán transzportfolyamatként hatolnak be a pórusrendszerbe, hanem kémiai reakcióba is lépnek a cementkövel.

A portlandcement hidratációs termékei közül a kalcium-hidroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) és a kalcium-szilikát-hidrát (C-S-H) fázisok savas közegben fokozatosan oldódnak, illetve dekalcinálódnak. Ennek következménye a cementkő szilárdságot adó vázának fellazulása, a pórustérfogat növekedése, a felületi rétegek leválása, illetve bizonyos savak esetén duzzadó vagy csapadékképző reakciótermékek megjelenése. A savkorróziót ezért nem célszerű és nem is javasolt egyetlen vizsgálati értékkel jellemezni: a tömegváltozás, térfogatváltozás, szilárdságvesztés, behatolási mélység, felületi roncsolódás, pH-profil és mikroszerkezeti átalakulás együttes értelmezése szükséges [1,2].

A beton savállóságának javításában meghatározó szerepe van az anyagtudományi megközelítésnek. A cél nem pusztán a 28 napos nyomószilárdság elérése, hanem olyan kötőanyag-mátrix kialakítása, amelyben a sav számára hozzáférhető, könnyen oldható komponensek mennyisége kisebb, a pórusrendszer kevésbé átjárható, az adalékanyag nem érzékeny, és a felület közelében kialakuló reakciózóna lassabban halad a beton belseje felé. Az NVKP\_16-1-2016-0019 kutatásban is ezt a szemléletet követtük: cementpépeken, habarcsokon és betonokon vizsgáltuk a portlandcement, a szilikaport, a metakaolin, a pernye, a kohósalak, illetve ezek kötőanyag-kombinációinak hatását savas közegekben, továbbá összevetettük a savkorróziós viselkedést a kloridion-migrációs eredményekkel [1].

## 2. A SAVKORRÓZIÓ FŐ MECHANIZMUSAI

A savkorrózió első lépése rendszerint a beton pórusolatának semlegesítése. A cementkő lúgossága a vasbetonban az acélbetét korrózióvédelme szempontjából elengedhetetlen, savas közegben azonban éppen ez a lúgos tartalom reagál a támadó közeggel. A savak hidrogénionjai először a pórusolatban lévő lúgokat és a kalcium-hidroxidot fogyasztják, majd a pH csökkenésével a szilárdsághordozó C-S-H fázisok is dekalcinálódnak. A folyamat eredményeként a kötőanyag-váz kalciumtartalma csökken, szilika-gél jellegű reakciótermék keletkezik, és a cementkő mechanikai integritása romlik [3,4,5].

Nem minden sav viselkedik azonos módon. Az ecetsav ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) és a tejsav ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ) szerves savak; a velük képződő kalciumsók oldhatósága és a diffúziós viszonyok jelentősen befolyásolják a károsodás sebességét. Ecetsavas közegben a kalcium-acetát ( $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca}$ ) jól oldódó reakciótermék, ezért a korrózió erősen oldódásos jellegű: a keletkezett kalcium-acetát az oldatba távozik, a tömegvesztés, a felületi, majd térfogati visszahúzódnak jól érzékelhető. Vizsgálatainkban az ecetsavas kezelés minden keveréknél tömegvesztéseket okozott, valamint az abrúziós, illetve abrúzió nélküli vizsgálati módszer közötti különbség viszonylag kicsi volt, ami szintén az erősen oldódásos karakterre utal [1].

A kénsav ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ezzel szemben nemcsak old, hanem szulfátos reakciótermékeket is képez. A kalciumionokkal gipsz ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) keletkezhet, majd a cementkő alumínátos fázisaival másodlagos ettringitképződés (secondary ettringite formation, SEF) is felléphet. A gipsz és az ettringit ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) részben pórusokban, részben a felületen jelenhet meg, tömegnövekedést és duzzadást okozva, miközben a szerkezet valójában károsodik. Ezért kénsavas korrózióknál a kezdeti tömegnövekedés nem értelmezhető automatikusan kedvező jelként. A kutatási anyagban a kénsavas kezelt mintákon gipsz- és ettringitképződést pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal is alátámasztottuk [1].

A szennyvízes környezetben külön figyelmet érdemel a biogén kénsavkorrózió. Ilyenkor a szulfát-redukáló, majd kénoxidáló mikroorganizmusok közreműködésével a betonfelület közelében kénsav keletkezik. A folyamatot a nedvesség, a hőmérséklet, a szellőzési viszonyok, a kénhidrogén ( $\text{H}_2\text{S}$ ) koncentráció és a felületi pH egyaránt befolyásolja. A károsodás leggyakrabban a fedlapok, csatorna és aknák légtérrel érintkező betonfelületen gyorsul fel, ahol a beton nem áll folyamatos víznyomás alatt, de a kondenzvíz és a savas biofilm jelen van [3,4].

A savkorróziós modellkísérleteknél és valós hatások értelmezésénél ezért mindig rögzíteni kell a sav típusát, koncentrációját vagy pH-ját, az oldatcsere gyakoriságát, a folyadék/próbatest térfogat arányt, a hőmérsékletet, az áramlási vagy abrúziós hatásokat és a vizsgált beton korát. Ugyanaz a betonösszetétel más rangsort mutathat ecetsavban, tejsavban és kénsavban, mert az oldhatóság, a csapadékképződés és a duzzadási mechanizmus eltér. A kutatás során lehetőségünk nyílt új savkorróziós vizsgálati protokollok és vizsgálati berendezések kidolgozására, amelyekben legalább 56 napos korú betonokat vizsgálunk, amelyeket vágást és víztelítést követően helyezünk el [6,7].

### 3. SAV-SPECIFIKUS ANYAGVÁLASZTÁSI SZEMPONTOK

A savas igénybevétel tervezésekor célszerű különbséget tenni ásványi savak, szerves savak és biológiailag képződő savas közegek között. Az ásványi savak – különösen a kénsav – esetén a savas oldódás mellett szulfátos reakciók is megjelenhetnek. Ez olyan helyzetet eredményez, amelyben a felület látszólag tömörebbé vagy nagyobb tömegűvé válhat, miközben a belső kötőanyag-váz már károsodik. Ilyen környezetben a szulfátálló cement önmagában nem feltétlenül elegendő, mert a savas oldódás és a duzzadó reakciótermék-képződés egyszerre van jelen. A kötőanyag tervezésnél a cement alumínát-tartalma, a kötőanyag Ca-tartalma, a pórusrendszer és a felületi réteg mechanikai stabilitása egyaránt fontos.

Szerves savaknál, például ecetsav vagy tejsav esetén a kalciumsók oldhatósága és a savas közeg utánpótlása döntő lehet. Ha a reakciótermék oldható, akkor nem alakul ki tartós, diffúziót lassító felületi réteg, mint a kénsav esetében, emiatt a cementkő oldódása folyamatos anyagvesztéssel járhat. Ilyen esetben a kis permeabilitás, a portlandit mennyiségének csökkentése és a saválló adalékanyag-váz különösen nagy jelentőségű. Eredményeinkben az ecetsavas vizsgálatoknál a tömegvesztés egyértelműbben követte a keverékösszetétel hatását, mint a kénsavas vizsgálatoknál, ahol a reakciótermék-képződés torzította a pusztán tömegalapú értékelést [1].

A biológiai savképződéssel járó környezetben a beton felületi pH-ja és nedvességi állapota időben változik. A tartósságot nemcsak az egyszeri savas behatás, hanem a mikrobiológiai kolonizáció, a kondenzvíz, a gázfázis és a tisztítási ciklusok együttese határozza meg. Ilyen esetben az anyagválasztás mellett az üzemeltetési paraméterek – szellőzés, lemosás, lerakódások eltávolítása, bevonat karbantartása – is a savkorrózió elleni védekezés részévé válnak.

### 4. A BETON SAVÁLLÓSÁGÁT MEGHATÁROZÓ ANYAGTANI TÉNYEZŐK

A savállóság fokozásának első feltétele a víz és az agresszív ionok bejutásának lassítása. Ennek klasszikus technológiai eszköze a kis víz-kötőanyag tényező, a megfelelő szemeloszlás, a hatékony tömörítés, a megfelelő utókezelés és a repedések korlátozása. A savkorrózió azonban nem azonosítható egyszerűen a vízzárósággal. A pórusrendszer finomsága, összeköttetése és telítettsége határozza meg a sav behatolási sebességét, ugyanakkor a cementkő kémiai összetétele határozza meg, hogy a bejutó sav milyen gyorsan fogyasztja el a lúgos és kalcium-tartalmú fázisokat.

A portlandcementkő savas közegben kedvezőtlen tulajdonsága a jelentős CaO-tartalom és a hidratáció során keletkező portlandit. A savállóság fokozásának egyik lehetséges útja ezért a portlandit mennyiségének csökkentése puccolános reakcióval. A metakaolin, a szilikapor és a megfelelő pernye a kalcium-hidroxiddal reakcióba lépve másodlagos kalcium-szilikát-hidrát (C-S-H), illetve kalcium-szilikát-alumínát-hidrát (C-A-S-H) hidrátfázisok képződését segíthetik elő. Ez finomíthatja a pórusrendszert, csökkentheti a kapilláris vízfelvételt, és mérsékelheti a sav számára könnyen hozzáférhető portlandit mennyiségét [1,5].

A szilikapor különösen finom szemcsemérete miatt kettős hatású: mikrotöltőanyagként javítja a szemcsék közötti kitöltést, puccolános reakciója révén pedig tömörebb cementkővet eredményezhet. Vizsgálatainkkal kimutattuk, hogy a szilikapor önmagában és más kiegészítő anyaggal kombinálva hatékonyan finomította a jellemző pórusátmérő-tartományt. Ugyanakkor az eredmények arra is figyelmeztetnek, hogy a szilikapor önmagában nem minden savas közegben adja a legkedvezőbb savállósági viselkedést; több esetben a hármas (ternary) kötőanyag-rendszerek – például metakaolin és szilikapor kombinációja – voltak kedvezőbbek [1,5].

A metakaolin gyorsabb puccolános reakcióra képes, mint sok pernye, ezért már fiatalabb korban javíthatja a tömörséget és a szilárdságot. Hatása azonban függ a metakaolin típusától, finomságától, reaktivitásától és adagolásától. A kutatási eredményekben két metakaolin típus eltérően viselkedett: ecetsavban az egyik metakaolin-típushoz kapcsolódó keverékek, illetve a metakaolin-szilikapor kombinációk kedvező eredményeket mutattak, míg kénsavas közegben más rangsor alakult ki. Ez megerősíti, hogy a savállóság nem vezethető le kizárólag az általános puccolános aktivitásból [1,5].

A pernye és a kohósalak alkalmazása szintén kedvező lehet, különösen hosszabb érlelési idő után. A szűrt kőszénpernye puccolános reakciója lassabb, ezért a korai pórusszerkezet és a korai kloridion-migrációs eredmények kedvezőtlenebbek lehetnek, később azonban jelentős javulás következhet be. A kohósalak hidraulikus és latent hidraulikus reakciói csökkenthetik a portlandit mennyiségét és kedvező transzporttulajdonságokat eredményezhetnek. Savállósági szempontból azonban a salakos rendszerek értékelésénél is fontos a sav típusa: a kisebb Ca/Si arány általában kedvezőbb lehet, ugyanakkor a savas oldódás és a reakciótermék-képződés összetett folyamat [1].

Az adalékanyag savállósága gyakran alulértékelt tényező. Karbonátos adalékanyagok – például mészkő vagy dolomitos mészkő – savas közegben közvetlenül is oldódhatnak. Erősen savas környezetben savállóbb szilikátos adalékanyagok, például kvarckavics, előnyösebbek lehetnek. Ugyanakkor az adalékanyag és a cementkő közötti átmeneti zóna (interfacial transition zone, ITZ) tömörsége, valamint a mikrorepedések jelenléte és aránya legalább ilyen fontos, mert a savas oldat gyakran ezen a gyengébb zónán keresztül halad.

## 5. CEMENTKIEGÉSZÍTŐ ANYAGOK ÉS ÖSSZETETT KÖTŐANYAG-RENDSZEREK

A savállóság fokozásában a cementkiegészítő anyagok (supplementary cementitious materials, SCMs) alkalmazása az egyik legfontosabb, iparilag is jól kezelhető eszköz. A cél a cementkő kémiai sérülékenységének és transzportképességének egyidejű mérséklése. A hatásmechanizmusok közé tartozik a portlandit fogyasztása a puccolános reakción keresztül, a finomabb pórusrendszer, a kisebb kapilláris vízfelvétel, a jobb szemcsekitöltés, valamint a kedvezőbb hidrátfázis-összetétel.

A kettős kötőanyag rendszerekben (binary blended cement) a portlandcement egy részét egyetlen kiegészítő anyag helyettesíti. Ilyen lehet a metakaolin, a pernye, a szilikapor vagy a kohósalak. A bináris rendszerek előnye az egyszerűbb technológiai kontroll, hátrányuk, hogy egyetlen kiegészítő anyag nem mindig képes egyszerre biztosítani a korai szilárdságot, a hosszú távú tömörödést, a kedvező reológiát és az agresszív savas közeggel szembeni ellenállást. A szilikapor például erősen finomítja a pórusszerkezetet, de vízigényt és adalék-szer-érzékenységet növelhet. A pernye kedvező hosszú távú hatású lehet, de lassabb reakciója miatt korai korban nagyobb átjárhatóságot okozhat.

A hármasszoros kötőanyag rendszerek (ternary blended cement) képesek a hiányosságokat részben kiegyenlíteni. A portlandcement, metakaolin és szilikapor, illetve portlandcement, pernye és szilikapor kombinációja a szemcseméret-eloszlás és a reakciókinetika szempontjából is kedvező lehet. A habarcsok kapilláris vízfelvételénél az is megfigyelhető volt, hogy az egyes kiegészítőanyag-családokon belüli kedvező eset rendszerint akkor állt elő, amikor a kiegészítő anyagot szilikapor szuszpenzióval együtt alkalmaztuk [1,5]. Ez arra is utal, hogy a mikrotöltő és puccolános hatások kombinációja gyakorlati szempontból is jelentős.

Ugyanakkor a hármasszoros rendszerek sem automatikusan jobbak minden savas közegben. Kénsavban például a gipsz- és ettringitképződés, valamint a reakciótermékek pórusokban történő felhalmozódása módosíthatja a tömegváltozást és a térfogatváltozást. Ecetsavban ezzel szemben a jól oldódó kalciumsók miatt a tömegvesztés közvetlenebbül követheti a cementkő oldódását. A keverékek rangsora ezért savtípusonként eltérhet. Gyakorlati tervezésnél nem elegendő azt kijelenteni, hogy egy adott kiegészítő anyag „savállóbb betont” eredményez; meg kell határozni, milyen savas közegben, milyen időtávon, milyen mechanikai és hidraulikai igénybevétel mellett várható javulás.

A cementkiegészítő anyagok adagolásánál a túlzott helyettesítési arány is kockázatos lehet. A portlandcement mennyiségének csökkentése mérsékelheti a portlanditot, de ha a hidratációs termékek mennyisége, a korai szilárdság vagy az utókezelés nem megfelelő, akkor a pórusszerkezet nyitottabb maradhat. Emellett a nagyobb kiegészítőanyag tartalom aggregációja, diszperzibilitása is akadály lehet. A savállóság optimuma ezért rendszerint nem a maximális kiegészítőanyag-tartalomnál, hanem egy technológiai és kémiaiilag kiegyensúlyozott, optimalizált tartományban található.

## 6. TECHNOLÓGIAI ESZKÖZÖK: TÖMÖRSÉG, UTÓKEZELÉS, REPEDÉSKORLÁTOZÁS

A kötőanyag optimalizálása csak akkor érvényesül, ha a beton technológiai minősége megfelelő. A savkorrózió a felületről indul, de a mikrorepedések, rosszul tömörített zónák, fészkesedés, nem megfelelően lezárt felületek gyors behatolási útvonalat biztosítanak. A kis víz-kötőanyag tényező, a hatékony folyósítószer-használat és a jól beállított konzisztencia alapfeltétel. A túlzott vízadagolás nemcsak a szilárdságot csökkenti, hanem növeli a kapilláris pórusok összekapcsoltságát, ami savas közegben gyorsabb károsodást eredményezhet.

Az utókezelés szerepe különösen jelentős a puccolános vagy kohósalakos kötőanyag-rendszereknél. Ezeknél a hosszabb távú reakciók kedvező hatása csak megfelelő nedvesség és hőmérséklet mellett alakul ki. Ha a felület korán kiszárad, a külső zóna porózusabb marad, vagy mikrorepedések keletkeznek, akkor a savas támadás éppen a legkritikusabb felületi rétegben gyorsul fel. Előregyártott elemeknél a gőzölés, hőkezelés vagy gyorsított érlelés hatását külön vizsgálni kell, mert a korai szilárdság növelése nem minden esetben jár együtt kedvező hosszú távú pórusszerkezettel.

A repedéskorlátozás savas környezetben nem pusztán esztétikai vagy vízzárósági kérdés. A repedések mentén a savas oldat mélyen bejuthat, a belső acélbetétek környezetében is csökkentheti a pH-t, és lokális károsodási göcöket hozhat létre. A zsugorodás, hőmérsékletváltozás, kényszeralakváltozás és terhelés okozta repedések korlátozására megfelelő vasalási kialakítás, utókezelés, keveréktervezés és kivitelezési fegyelem szükséges. Savállósági szempontból a kevés, de nagyobb repedés kedvezőtlenebb, mint a jól kontrollált, finom repedéseloszlás. A nagyobb repedéstágasság és –mélység esetén a sav behatolási mélysége és a lokális reakciósebesség is megnőhet.

Felületvédelmi rendszerek alkalmazása sok esetben elkerülhetetlen. Bevonatok, impregnálások, műgyanta alapú rétegek, saválló burkolatok vagy bélelések segítségével a cementkötésű anyag közvetlen savkontaktusa csökkenthető. Az MSZ 4798:2016/4M:2023 szabvány szerinti XA6(H) környezeti osztály esetén a betonösszetétel optimalizálása önmagában rendszerint nem elegendő, ezért a gyakorlatban másodlagos védelem – például saválló bevonati rendszer – alkalmazása is szükségessé válhat. Ezek azonban nem helyettesítik a megfelelő betonösszetételt. A bevonat sérülése, repedése vagy tapadási hibája esetén az agresszív közeg koncentráltan támadhatja a betont. Ezért a tartós megoldás rendszerint többszintes védelem kialakításával lehetséges: megfelelően megtervezett beton és kivitelezés, repedéskorlátozás, saválló felületvédelem és rendszeres ellenőrzés.

## **7. ALTERNATÍV KÖTŐANYAGOK: ALKÁLI-AKTIVÁLT ANYAGOK ÉS GEOPOLIMEREK**

Az alkáli aktivált anyagok és geopolimerek a savállóság szempontjából külön figyelmet érdemelnek. Ezekben a rendszerekben a kötőanyag-mátrix kémiai felépítése eltér a portlandcementkötőtől; különösen alacsonyabb kalcium-tartalmú, alumino-szilikát jellegű geopolimer rendszereknél a savas támadás mechanizmusa és sebessége kedvezőbb lehet. Mivel a klasszikus portlandcementes beton savas közegben kalciumtartalma miatt sérülékeny, logikus kutatási irány a kisebb Ca-tartalmú kötőanyagok fejlesztése [8,9].

A geopolimer rendszerek savállósági előnye azonban nem automatikus. A kiindulási anyag – például pernye, salak, metakaolin –, az aktivátor típusa és koncentrációja, a folyadék/szilárd anyag arány, az érlelési hőmérséklet, a pórusszerkezet és az adalékanyag-váz együtt határozza meg az alkáli-aktivált teljesítőképességét. Salakalapú, nagyobb kalcium-tartalmú alkáli-aktivált rendszerek viselkedése közelebb állhat bizonyos cementes rendszerekhez, míg a metakaolin- vagy pernyealapú, kisebb kalcium-tartalmú geopolimerek eltérően viselkednek.

A kutatás során vizsgálat alkáli-aktivált anyagok és geopolimerek kísérleti eredményei biztatónak minősülnek, a kötőanyag optimalizálásán keresztül szálerősítéssel javított tulajdonságú geopolimerekig jutottunk [1,10]. A szálerősítés azért lehet fontos, mert savas közegben a felületi réteg gyengülése és a zsugorodási, duzzadási vagy hőmérsékleti hatások mikrorepedéseket indíthatnak el; a megfelelő szálerősítés a repedésnyílás korlátozásával közvetlenül a tartósságot is javíthatja.

Az alternatív kötőanyagok ipari bevezetésénél ugyanakkor figyelembe kell venni a szabványosítás, minőségállandóság, kivitelezhetőség és környezeti hatások kérdéseit. A savállóság önmagában nem elegendő: igazolni kell a nyomó- és hajlítószilárdságot, zsugorodást, kúszást, fagyállóságot, tűzállóságot, acélbetétekkel való kompatibilitást, valamint a hosszú távú térfogatállandóságot is.

## **8. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ÉS AZ EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE**

A savkorróziós vizsgálatok eredményeit erősen befolyásolja a módszer. Statikus merítéses vizsgálatnál a savas oldat pH-ja, az oldatcsere gyakorisága és a próbatest térfogatához viszonyított oldatmennyiség alapvető. Ha az oldat gyorsan semlegesedik, a vizsgálat a valós savterhelésnél kedvezőbb képet adhat. Ha viszont túl gyakori az oldatcsere vagy túl nagy a savtöbblet, a vizsgálat nagyon agresszív, gyorsított jellegű lesz. Az NVKP\_16-1-2016-0019 kutatás záró kiadványában a pépkockák vizsgálatánál az oldatcsere heti gyakoriságú volt, és a kezelőszer térfogata a próbatest térfogatának körülbelül tízszerese volt [1].

Az abráziós hatás szintén lényeges. Valós környezetben a reakciótermékek gyakran nem maradnak zavartalanul a felületen: vízáramlás, tisztítás, szemcsés hordalék, mechanikai súrlódás vagy nyomásingadozás eltávolíthatja a fellazult réteget. Ecetsav esetén az abrázió hatása kevésbé meghatározó, mert a reakciótermék jól oldódik. Kénsav esetén viszont a felületi gipszréteg részben lassíthatja a további savbehatolást, de ez a védelem bizonytalan és hosszú távon nem tekinthető stabilnak. Az abrázióval végzett vizsgálatok ezért sokszor realisabb képet adnak áramló vagy tisztított felületekről.

A dinamikus, gépi módszerek előnye, hogy jobban modellezik az áramlással, cserélődő oldattal és felületi igénybevétellel járó valós körülményeket. A kutatási projektben két savkorróziós prototípus berendezés került fejlesztésre: forgórendszerű, valamint fűvókás rendszerű berendezések. Ezekhez új vizsgálati eljárások is rögzítésre kerültek, amelyeket a kutatás során habarcs-, illetve betonpróbatesteken is alkalmaztunk [6,7]. A cementpép, habarcs és beton savkorróziós rangsora nem feltétlenül azonos: a habarcsban és a betonban az adalékanyag, az átmeneti zóna és a nagyobb próbatestgeometria is szerepet játszik.

Az értékelésnél célszerű több mérőszámot párhuzamosan alkalmazni: a tömegveszteség, térfogatváltozás, felületi erózió, nyomószilárdság-csökkenés, ultrahangos vizsgálat, pH-profil, fenolftalein indikátoros behatolás vizsgálat, vékonycsiszolati elemzés, pásztázó elektronmikroszkópos (SEM/EDS) és higanyintrúziós porozimetriás (MIP) vizsgálatok eredményei egymást kiegészítő információkat adnak. Különösen kénsavas közegben lehet félrevezető a tömegváltozás önmagában, mert a károsodás tömegnövekedéssel is együtt járhat. A jó vizsgálati program ezért nemcsak rangsort állít, hanem megmagyarázza a károsodási mechanizmust is [1,11].

## 9. SAVÁLLÓSÁG ÉS KLORIDÁLLÓSÁG: MIÉRT NEM AZONOS TARTÓSSÁGI MUTATÓ?

A savállóság és a kloridion-behatolással szembeni ellenállás között gyakran feltételeznek kapcsolatot, mert mindkettőnél fontos a pórusszerkezet, a kapilláris vízfelvétel és a beton átjárhatósága. Valóban igaz, hogy egy tömörebb, kisebb víz-kötőanyag tényezőjű, finomabb pórusrendszerű beton általában lassabban engedi be az agresszív közeget. A kloridállóság főként iontranszport, kötött és szabad kloridion tartalom, elektromos migráció, diffúzió és a vasalás korróziós feltételeinek kérdése. A savállóság ezzel szemben a cementkő kémiai fogyásával, dekalcinálódásával, oldódásával, illetve savtípustól függően duzzadó vagy csapadékképző reakciótermékek kialakulásával jár.

Ezért előfordulhat, hogy egy keverék kiváló kloridion-migrációs eredményt mutat, de adott savas közegben nem a legellenállóbb. A pernye-tartalmú keverékek például későbbi korokban erősen javuló kloridion-migrációs együtthatót adhatnak, mert a pórusszerkezet finomodik és a kloridtranszport lassul. Ugyanez a keverék savas oldódás vagy kénsavas duzzadási reakciók szempontjából másként viselkedhet. A szűrt kőszénpernye tartalmú keverékek kloridion-migrációs együtthatója későbbi korokban jelentősen csökkent, ugyanakkor savas közegekben a rangsor savtípustól és adagolástól függően változott [1,12,13,14].

A metakaolin és a szilikapor hatása szintén jó példa. A finom pórusszerkezet és a puccolános portlandit-fogyasztás kedvezhet mind a kloridállóságnak, mind a savállóságnak, de a két tulajdonság optimuma nem feltétlenül ugyanott jelentkezik. Kloridállóságnál a kloridion megkötő képesség, az alumínátfázisok jelenléte és a pórusoldal elektromos vezetőképessége is szerepet kap; savállóságnál viszont a lúgos tartalék, a Ca/Si arány, a reakciótermék oldhatósága és a felületi réteg stabilitása lehet döntő jelentőségű. Ebből következik, hogy a kloridion-migrációs vizsgálat nem használható a savállóság közvetlen helyettesítő vizsgálatként.

A gyakorlati tervezésben a két tartóssági követelményt egymástól függetlenül kell igazolni, ha a szerkezet mindkét igénybevételnek kitett. Például egy tengerparti vagy olvasztósóval terhelt, ugyanakkor ipari savas közegben is működő szerkezetnél egyszerre szükséges a kloridion-behatolás korlátozása és a savas károsodás lassítása. Az optimális betonösszetétel ilyenkor kompromisszum: nem a legjobb egyetlen laboratóriumi mutatóra, hanem a teljes környezeti hatásra kell méretezni.

## 10. GYAKORLATI TERVEZÉSI AJÁNLÁSOK

Savkorrózióknak kitett beton esetén az első lépés az expozíció pontos meghatározása. Meg kell adni a sav típusát, koncentrációját vagy pH-ját, az oldat utánpótlásának lehetőségét, a hőmérsékletet, a nedves-száraz ciklusokat, az áramlást, az abrúziót, a biológiai aktivitást és a tervezett élettartamot. A „savas közeg” önmagában nem elégséges specifikáció, mert ecetsav, tejsav, kénsav vagy biogén kénsav esetén eltérő anyagválasztás lehet indokolt.

Második lépésként a betonösszetételt a transzport és a kémiai ellenállás együttes csökkentésére kell optimalizálni. Általános irányelvként kis víz-kötőanyag tényező, megfelelő cementkiegészítő anyag, jó szemeloszlású saválló adalékanyag, hatékony folyósítószer, gondos tömörítés és hosszabb, nedves utókezelés javasolható. A szilikapor, metakaolin, pernye és kohósalak alkalmazása indokolt lehet, de a helyettesítési arányt előzetes vizsgálatokkal kell ellenőrizni vagy igazolni. Az összetett (ternary) kötőanyag-rendszerek alkalmazása különösen ígéretesek, ha a korai és késői tulajdonságokat egyaránt optimalizálni kell.

Harmadik lépésként a felületvédelem szükségességét kell mérlegelni. Erősen savas, tartósan nedves vagy áramló közegben a betonösszetétel javítása önmagában ritkán elegendő. Saválló bevonatok, műgyanta rendszerek, kerámia vagy polimer bélések, illetve cserélhető védőrétegek alkalmazása indokolt lehet. A bevonat kiválasztásánál ellenőrizni kell a savállóságot, tapadást, repedésáthidaló képességet, hő- és nedvességterhelést, tisztíthatóságot és javíthatóságot.

Negyedik lépés a minőségellenőrzés. A nyomószilárdság önmagában nem elegendő. Savkorróziós vizsgálatot, kapilláris vízfelvételt, vízzáróságot, porozitási vizsgálatot, kloridion-migrációt – ha releváns –, valamint mikroszerkezeti értékelést célszerű előírni. A próbatesteket olyan korban kell vizsgálni, amely a tényleges beépítési, használatbavételi vagy terhelési állapotot jól közelíti. Puccolános rendszereknél az egyéves vagy későbbi vizsgálatok különösen informatívak lehetnek, mert a hosszú távú tömörödés ekkor jelenik meg teljesebben.

Végül a fenntartási stratégia is a savállóság növelésének része. A rendszeres szemrevételezés, pH-mérés, bevonatellenőrzés, repedéstérképezés és időszakos mintavétel segíthet a károsodás korai felismerésében. Savkorróziónál a károsodás gyakran gyorsuló jellegű: amint a felület fellazul és a pórusrendszer megnyílik, a további savbehatolás intenzívebbé válik. A korai beavatkozás megelőzheti az élettartam-csökkenést (1. táblázat).

*A savállóság fokozásának főbb beavatkozási szintjei*

1. táblázat

Beavatkozási szint	Fő hatás	Megjegyzés
Kötőanyag-összetétel	Portlandit csökkentése, pórusfinomítás	SCM-ek és hármass rendszerek előzetes vizsgálatokkal választhatók.
Víz-kötőanyag tényező	Permeabilitás és kapilláris vízfelvétel mérséklése	Kis víz/kötőanyag tényező csak megfelelő tömörítéssel és utókezeléssel hatásos.
Adalékanyag	Savval szembeni ásványtani stabilitás	Erős savas közegben a karbonátos adalékanyag kockázatos lehet.
Felületvédelem	Közvetlen savkontaktus csökkentése	Bevonat, bélés vagy impregnálás a betonminőség mellett alkalmazandó.
Vizsgálat és monitoring	Mechanizmus és tönkremeneteli sebesség igazolása	Tömeg-, térfogat-, szilárdság- és mikroszerkezeti vizsgálatok együtt értékelendők.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A beton savkorrózióval szembeni ellenállóképességének fokozása összetett, több szinten megvalósítandó feladat. A portlandcementtel készült beton savas közegben kémiai sérülékeny, ezért a cél a károsodás lassítása a tervezett élettartam biztosítása érdekében. A legfontosabb anyagtanilag eszközök a portlandit mennyiségének csökkentése, a pórusrendszer finomítása, a permeabilitás mérséklése, a saválló adalékanyag-váz, a megfelelő cementkiegészítő anyagok és adott esetben az összetett (ternary) kötőanyag-rendszerek alkalmazása. A szilikapor, metakaolin, pernye és kohósalak kedvező lehet, de hatásuk nem általánosítható minden savas közegre.

A sav típusa meghatározó. Ecetsav és tejsav esetén az oldódásos jelleg, kénsav esetén a gipsz- és ettringitképződés, valamint a duzzadási folyamatok külön értelmezést igényelnek. Emiatt a tömegváltozás, térfogatváltozás és szilárdságvesztés értékelése önmagában nem mindig elegendő; a mikroszerkezeti vizsgálatok és a behatolási front elemzése fontos kiegészítő információt ad. A statikus és dinamikus savkorróziós vizsgálatok eltérő körülményeket modelleznek, ezért a vizsgálati módszert a valós expozícióhoz kell illeszteni.

Kiemelendő, hogy a savkorróziós ellenállóképesség és a kloridion behatolással szembeni ellenálló képesség (kloridállóság) között nem feltétlenül áll fenn közvetlen összefüggés. Bár mindkettőt befolyásolja a pórusrendszer, a savas károsodás kémiai oldódási és reakciótermék-képződési folyamat, míg a kloridállóság elsősorban iontranszporttal, kloridkötéssel és az acélbetét korrózióját kiváltó kloridion koncentráció elérésének feltételeivel kapcsolatos. A tartós beton tervezése ezért nem egyetlen teljesítőképességi mutató maximalizálása, hanem az adott expozíciós környezetre optimalizált, vizsgálatokkal igazolt anyag- és mikroszerkezeti rendszer kialakítása.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak 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, valamint az Osztrák-Magyar Akció Alapítvány 115ou5 sz. „Die Verwendung recycelter Zuschlagstoffe aus Bau- und Abbruchabfällen in neuem, nachhaltigem Beton” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] Kopecskó, K., Horváth, Sz., Kováts, M., Mlinárik, L., Must, A., Somlai, B. Zsovár, Zs. & Balázs, L.Gy.: A beton kémiai ellenálló képességének fokozása - áttekintés az NVKP\_16-1-2016-0019 projekt altémájának feladatairól és eredményeiről. In: Balázs, L. György; Salem, G. Nehme; Lublőy, Éva; Kopecskó, Katalin; Hlavicka, Viktor (szerk.), Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózió ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése : TŰZ, FAGY, SAV - NVKP\_16-1-2016-0019 Projektbeszámoló, kutatást záró kiadvány. Budapest, Magyarország: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2021) 562 p. pp. 97-129. 33 p.
- [2] Balázs L.Gy. – Kausay T. – Kopecskó K. – Nemes R. – Nehme S.G. – Lublőy É. – Józsa Zs. – Arany P. (2019), „Betonok oldódásos korróziója – szakirodalmi áttekintés”, <https://doi.org/10.32969/VB.2019.3.1>
- [3] Mlinárik, L. Kopecskó, K. (2014), „Effects of long-term acidic treatment on the hydration mechanism of metakaolin (MK) containing cement pastes”, In: J. Bastien; N., Rouleau; M., Fiset; M., Thomassin (szerk.), Proceedings of The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Quebec City, Kanada : Université Laval, pp. 79-84. 6 p.
- [4] Mlinárik, L. Kopecskó, K. (2016), „Influence of severe acidic circumstances on hydration and microstructure of cementitious materials”, In: Koichi, Maekawa; Akio, Kasuga; Jun, Yamazaki (szerk.), Proceedings of 11th fib International PHD Symposium in Civil Engineering, Tokió, Japán: University of Tokyo, p. 927, pp. 261-268
- [5] Mlinárik, L. Kopecskó, K. (2017), „The influence of combined application of two SCMs on the corrosion and acid attack durability of mortars”, PERIODICA POLYTECHNICA-CIVIL ENGINEERING 61: 2 pp. 313-321, 9 p. <https://doi.org/10.3311/PPci.9352>
- [6] Kopecskó, K., Balázs, L.G. & Péczeli, I.: Protocol for testing the acid corrosion of concrete or reinforced concrete elements with nozzle acid-corrosion equipment, 2020, Önkéntes műnyilvántartás száma: 009226, Oltalmi forma, Benyújtás országa: Magyarország
- [7] Kopecskó, K., Balázs, L.G. & Péczeli, I.: Vizsgálati protokoll beton ill. vasbeton elemek kémiai ellenállóképességének vizsgálatára forgógépes módszerrel, 2020, Önkéntes műnyilvántartás száma: 009227, Oltalmi forma, Benyújtás országa: Magyarország
- [8] Shi, C., Roy, D., Krivenko, P.: Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor & Francis, 2006.
- [9] Provis, J. L., van Deventer, J. S. J. (eds.): Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. Springer, 2014.
- [10] Kopecskó, K., Hajdu, M., Khalaf, A.A. & Merta, I.: Fresh and hardened properties for a wide range of geopolymer binders – An optimization process. CLEANER ENGINEERING AND TECHNOLOGY 21 Paper: 100770, 12 p. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100770>
- [11] Alexander, M., Bertron, A., De Belie, N. (eds.): Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments. RILEM State-of-the-Art Reports, Springer, 2013.
- [12] NT BUILD 492 Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments (1999).
- [13] Kopecskó K. (2008), „Kloridion megkötőképesség és kloridmigráció a betonban”, Betonszerkezetek tartóssága, Konferencia kiadvány, Budapest, pp. 141-164.
- [14] Kopecskó, K. & Balázs, L.G.: Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements. ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 2017 Paper: 7940247 , 13 p. (2017). <https://doi.org/10.1155/2017/7940247>