

A VASBETONSZERKEZETEK IDOÁLLÓSÁGÁNAK KULCSA A BETONSTRUKTÚRA MINOSÉGE

*Szalay Tibor**

RÖVID KIVONAT

Az eddig általánosan alkalmazott szilárdságú és teljesítő képességu beton (továbbiakban: normálbeton) sajátos jellegzetessége a csökkent idoállóság. A vonatkozó kutatások és építési tapasztalatok szerint a vasbeton-szerkezetek szükséges és kello, vagyis megfelelo, illetve elégséges tartósságát, mindenekelott a HSC/HPC (nagyzilárdságú és nagyteljesítményu) beton alkalmazásával lehet elérni. Ebben a dolgozatban a struktúrahibák sajátos feltárásával foglalkozunk és ennek alapján a szóban forgó HSC/HPC beton jelentőségére kívánunk rámutatni.

1. BEVEZETÉS

A XX. század első harmadáig általános tapasztalat volt, hogy vasbeton tartósságát (idoállóságát) a beton anyaga és a viszonylag egyszerű szerkesztési szabályok önmagukban garantálják. Később az erotani tervezés eszközeinek fejlődésével, az anyagtani és méretezés-elméleti ismeretek bővülésével, a feszítési technológia elterjedésével párhuzamosan megindult a szerkezeti méretek eroteljes csökkentése. A fogyasztói társadalommal járó környezeti hatások (pl. a hidak sózása, a savas esok) megjelenése, továbbá adott esetben, a tervezési - kivitelezési - használati hibák együttesen, vagy külön-külön eredményezték, hogy emelkedtek a fenntartási költségek. Egyre gyakrabban kellett a használatot korlátozni (pl. hidaknál a sebességet csökkenteni), majd a szerkezet megerosítését, vagy esetenként a lebontást elrendelni. A vasbetonszerkezetek korlátlan tartósságába vetett illúzió szertefoszlott. A tartóssággal kapcsolatos kedvezotlen tapasztalatok, illetve a korróziós károk okainak elemzése és azok elkerülésének lehetőségei, a szakmai konferenciák állandó témája lett. A tapasztalatcsere és a széleskörü kutatások eredményeként a tartósság biztosításának eszköztára napjainkban kezd kialakulni. Elsorendu feladattá vált a vasbetonszerkezetek tartósságát befolyásoló tényezok felderítése és a megelőzés eszközeinek kimunkálása. A szerkezeti hibák tanulmányozása alapján a kutatások igazolták, hogy a csökkeno idoállóság, az alkalmazott beton eredendoen kedvezotlen minoségi állapotának a következménye. Az eleve kedvezotlen minoségi állapot az adott beton molekuláris-, mikro- és makro-struktúrájának közvetlen következménye. Az eddig általánosan alkalmazott szilárdságú és teljesítő képességu beton (továbbiakban: normálbeton) sajátos jellegzetessége a csökkent idoállóság. A vonatkozó kutatások és építési tapasztalatok szerint a vasbeton-szerkezetek szükséges és kello, vagyis megfelelo, illetve elégséges tartósságát, mindenekelott a HSC/HPC (nagyzilárdságú és

* okl. vegyész mérnök, a kémiai tud. doktora, Debreceni Egyetem, TTK Fizikai Kémiai Tanszék

nagyteljesítményű) beton alkalmazásával lehet elérni. Ebben a dolgozatban a struktúrahibák sajátos feltáráásával foglalkozunk és ennek alapján a szóban forgó HSC/HPC beton jelentőségére kívánunk rámutatni.

2. A BETON FŐ KOMPONENSEI ÉS AZOK LEGFOBB JELLEMZŐI

2.1. A cementkeverék összetétele, rácsszerkezetének makro-, mikro- és molekuláris felépítése

A mindennapi értelemben vett betont, meghatározott arányú *portlandcement* (= PC), *adalékok* (homok és kavics, különleges esetekben adalékszerek stb.) és víz összekeverésével készítik, homogenizálják, formázzák, öntik, tömörítik, vibrálják stb.

A homok és a kavics is szilikátásvány, ezért a felületükön lévő, *alvó terminális* (= véghelyzeti) $-Si-OH$ –csoportokat, a cement hidratációs hője/reakcióentalpiája felaktiválja. Mialatt ezek ugyanúgy oxigénhidras $-Si-O-Si-$ kötésekkel létesítenek (2-2 OH –csoportból, 1-1 vízmolekula kilépésével), mint általában a hidraulikus/cementáló tulajdonságú anyagok általában, a következő séma szerint.¹

Ismert, hogy a PC jól meghatározott oxid- és fázis-összetételű. [4] Ezek a fémoxidok, részben *bázisanhidridek* (döntően „égetett mész”: $CaO=C$, a cementkeverék tágabb értelemben *a beton 1. fokkomponense*). Másrészt *savanhidridek* (foként $SiO_2=S$, ez a *2. fokkomponens*), továbbá az *amfoter* tulajdonságú (a körülményektől, azaz a közeg pH-jától függően, savként vagy bázisként viselkedő anyag) *alumínium-oxid* ($Al_2O_3=A$) és a vas(III)-oxid ($Fe_2O_3=F$). A következő összetételű ásványi fázisok C_3A , C_3S , ? $-C_2S$, C_4AF , előbb vízmolekulák felvételével hidratálódnak, majd leadásával, „átrendeződnek”. Ezek alkotják a kalcium-szilikát-hidrátokat (=CSH). Ezekből előbb *cementgél*, majd *cementkeverék lesz*. Ez egy több/kevesebb SiO_4 –tetraéderből álló, közös oxigénatomokkal, mint oxigénhidakkal összekapcsolt térrács, (ld. ³ lábjegyzet), aminek a negatív elektromos töltését, túlnyomóan kalciumionok kompenzálják. A szilárdság hordozója tehát az $(-Si-O-Ca-O-Si-O-)_n$ (sematikus) összetételű lánc, ami azonban közel sem lineáris, mert az Si-atomoknál, a tér 3 irányában elágazik, n értéke nem állandó, esetenként $n \gg 1$.

Könnnyen belátható, hogy az olyan *rácsidegen oxoanionok* beépülése, mint az SO_4^{2-} és CO_3^{2-} , rontja a szilikátrács² homogenitását, az Na^+ , K^+ és Mg^{2+} *kationok* pedig a rácsközi helyekről szorítják ki a kalciumionokat, mert jellemeresebbek.

¹ A tiszta SiO_2 –nek legalább 12 kristály-módosulata létezik, (a szennyezettnek pedig, több mint 22). Közülük az α - kvarc fordul elő a legáltalánosabban, minthogy sok kőzetnek, pl. gránitnak és homokkőnek, fő ásványi összetevője. Az SiO_2 fő kristály-módosulatai végtelen elrendezésű, tetraédres $\{SiO_4\}$ –egységekből tevődnek össze, amelyekben a tetraéder csúcsain az oxigének közösek. Az amorf SiO_2 nagyon porózus változata a *szilikagél*. Ez vízmegkötő anyagként (abszorbensként) vált ismertté. Az $SiO_2 - H_2O$ kettős anyagi rendszer már önmaga is bonyolult. Ha pl. nagy nyomáson, 1 – 2 % vizet adunk az SiO_2 -höz, akkor olvadáspontja akár 800 °C –kal is lecsökkenhet, ami valószínűleg annak a következménye, hogy az $-Si-O-Si-$ kötésekkel terminális $-Si-OH$ –csoportok váltják fel, ami szerkezetromboló hatásként jelenik meg. (Bovebben l. pl.[2, 3].)

² A kénsav (H_2SO_4) sokkal, a szénsav (H_2CO_3) pedig kevésbé erős sav, mint a kóvasav. Az erősebb jellemű elemek/ionok kiszorítják a gyengébbeket. Az elemek jellemerőségétől függ a fémionok hidrolízise is. [3] Pl. a vas(II)-ionok OH^- -ionokat kötnek meg ekkor, és a keletkező $Fe(OH)^+$ vagy

A cementko 3. fokkomponense a víz. A beton lényegét kifejező CSH betuszó azonban eltakarja a rendkívül változatos kémiai/ásványi összetételt.

2.2. A víz többszörös szerepe a betonban

A cement és az adalékok mellett, a beton tulajdonságait leginkább a víztartalom határozza meg. Emiatt egyrészt előírják, másrészt a gyártás és a beépítés helyén egyaránt ellenőrzik a víz (v) és a cement (c) tömegének a hányadosát, a v/c –tényezőt, illetve a víz és az összes hidraulikus/cementáló kötoanyag (b) tömegének a hányadosát (v/b).

A PC megkötéséhez, a kémiailag szükséges víz mennyiségét, $v/c = 0,20 - 0,23$ értékure becsülik. Az ilyen beton azonban nem bedolgozható, a mindennapi gyakorlatban (szokásosan) elérheti a 0,6 értéket is. A nagyteljesítményu és nagy szilárdságú beton készítésekor a 0,30 – 0,35 érték tartására törekszenek. (A megfelelo konzisztenciát képlékenyítő szerek használatával érik el. L. plasztifikátorok és szuperplasztifikátorok.)

A víznek azonban csak egy része kötődik meg hidrátként, kisebb része felületi erokkal³ „abszorbeálódik”, a maradék viszont *szabad vízként*, mint *oldószer és közeg*, az *anyagtranszportot* (vagyis a koncentrációk, a homérséklet, a nyomás és az ozmózisnyomás kiegyenlítését) segíti elo.

2.3. A pórusrendszer és folyadékának jellemzoi

A hagyományos betonokban általában 1 – 2 nm átmérou *légpórusok* és kb. 1 ? m méretu *kapilláris pórusok* képzodnek. Az ilyen betonoknak, általában és viszonylag nagy a *permeabilitása*. [5] (Szárázon azonban nagy lehet a levego/gáz-átereszto képessége is!)

Könnyen belátható, hogy a cementkoben kialakuló *pórusrendszer nagysága és minosége a betonkeverék kezdeti víztartalmának a függvénye*. A pórusok lehetnek nyitottak, vagy zártak. A nyitott pórusok közvetlen összeköttetésben lehetnek egymással és a felülettel. A nyitottakat szokás kapillárispórusoknak, a zártakat pedig légpórusoknak nevezni. [6] A bezárt folyadékot gyakran, helytelenül pórusvíznek mondják. Jóllehet ez egy telített oldat, amelyben az oldott anyagok, foként ionok koncentrációja függ a szennyezettségtol, a homérséklettol és a nyomástól.

Ha a pórusfolyadék összetételét könnyen és pontosan meg lehetne határozni, akkor a beton újlenyomataként használhatnánk.

Napjainkban különös figyelmet fordítanak a pórusfolyadékok vizsgálatára, annak ellenére, hogy nagy nehézségekbe ütköznek. Már maga a mintavétel is problematikus. A cementkobel 320-375 MPa (= több mint 3000 atm!) nyomással

Fe(OH)₂ mellett, felszaporodnak a hidrogénionok (protonok), ezért a közeg savanyodik. (A beton kialakulásakor a kevésbé oldékony, pl. Mg(OH)₂ kiválásakor, közvetlenül is savanyodhat az oldatfázis.)

³ A Coulomb-féle törvény szerint két ellentétes elektromos töltés (e_i) között fellépo elektrosztatikus ero (P), a közöttük lévo távolság (r) négyzetével és a közeg relatív permittivitásával (ε) fordítva arányos: $P = e_1 e_2 / (r^2 \epsilon)$. A ε(víz) = kb. 80. A fémoxidok határfelületén ez utóbbi 10 alá is csökkenhet, ezért ott az ionok, és a víz dpólusú molekulái, a szokásosnál sokkal erosebben tudnak megkötodni. (L. még kapilláris vízbeszívás.)

préselik ki, választják szét a folyadék és a szilárd fázist. [7 – 9] Többek között megállapították, hogy a cement hidratációja kezdeti szakaszában az ásványi fázisok jelentős része még változatlan állapotban van, ezért a folyadékfázis ionjai nincsenek oldási egyensúlyban, a folyamatos oldódás és kicsapódás jellemzi a rendszert. A referencia-időtartam (28 nap) alatt azonban, az oldási egyensúly csaknem teljessé válik. Következésképpen a legtöbb cement esetében ekkorra, vagyis a közel teljes megszilárdulás után, az oldat összetétele már nem változik.

Az alkálifémionok (Na^+ és K^+) döntő része a hidratáció kezdetén megy oldatba. További dúsulásuk csak a víz (oldat) térfogatának a csökkenésére vezethető vissza. Pl.: PC és v/c = 0,5 alkalmazásakor, 1 nap elteltével, az oldat pH-ja már meghaladja a 13,6 értéket, de 28 elteltével sem lesz ennél lényegesen nagyobb, alig haladja meg a 13,8 értéket. Mivel a korszerű, *nagyteljesítményű betonok* v/c –tényezője ennél lényegesen kisebb, ezért az oldatfázis ionkoncentrációja jelentősen nagyobb lehet. Ennek egyik mértéke, a *hidroxidionok koncentrációja, meghaladhatja a 600 mol/liter, azaz 0,6 mol/dm³ értéket is.*

10x10x60 mm - es, cementke és habarcs – mintákkal végzett kísérletek során, 1 napos nedves, vagy levegőatmoszférás tárolás esetében, az összetétel-változás már jól érzékelhető volt. Az 1 éves tárolás után végzett analízis tanúsága szerint, *az alkáliáknak vízben oldódó részének a koncentrációja jelentősen lecsökkent*, ami nyilvánvalóan kihat a pórusfolyadék összetételére is, pl. a pH értéke lényegesen lecsökkent. *Miközben azonban, pl. a szulfátionokra jutó arányuk/hányaduk változatlan maradt.*

A pH-érték csökkenésére vezető külső behatások mellett, a pórusfolyadék összetételét más mechanizmusok is befolyásolhatják. Ezek közé tartozik az alkálifémionoknak a megkötődése, a fellépő *alkálszilikát-reakció következtében* (ASR, l. később is). [7]

3. A BETON ÉS A VASBETON MEGBETEGEDÉSEI

Az ismert (gyakorlati okokból megengedett) mértéku szulfát, klorid stb. rácsidegen szennyezések mellett, fokozottan számolni kell a beton állapotát döntően megváltoztató, külső (behatoló) szennyeződésekkel, illetve tényezőkkel is, mint pl. savas esők, szulfátos talajvizek, iparvidéki vagy tengeri atmoszférák, fagyásgátló, vagy csúszáscsökkentő sók, műtrágya-hulladékok.

3.1. A beton savanyodása és következményei

3.1.1. *Az elkarbonátosodás* A tiszta és száraz levegő CO_2 tartalma 0,031 térfogat %, illetve 0,047 tömeg %. Azt sem árt tudni, hogy az 1 m³, vízzel telített levegőnek, mennyi a víztartalma: 0 (°C): 4,87 (g); 10: 9,36; 20: 17,16; 30: 30,09.

A CO_2 a levegőből közvetlenül gázként, de főként oldott alakban juthat be a betonba. A CO_2 a hőmérséklettől (T) és a nyomástól (p) függően, előbb fizikailag oldódik a vízben, majd kémiai reakcióba lép, és *szénsavat* (H_2CO_3) képez. Ezt követően a szénsav igen gyorsan ionjaira (H^+ , HCO_3^- és CO_3^{2-}) bomlik. A beton lúgos pH- tartományában azonban csak CO_3^{2-} alakjában fordulhat elő. A „száraz” betonban - esetleg- szabad CO_2 –ként is. Következésképpen a beton rácsközi helyein lévő

kalciumionokkal közvetlenül reagál, miközben CaCO_3 keletkezik, és hidrogénionok szabadulnak fel, ezért minél több széndioxid hatol be, annál inkább „savanyodik” a beton, (mert a visszamaradó protonok $[\text{H}^+]$ a hidroxidionokkal vízmolekulává egyesülnek. Következésképpen a közegben fokozatosan csökken hidroxidionok koncentrációja.)

Savas esok hatására (az esovíz pH-értéke, akár 4 alá is lecsökkenhet) a betonelemek peremén felléphet a „*cseppkoképződési mechanizmus*”. Ugyanis a semlegeshez⁴ közeli pH-tartományban stabilis a HCO_3^- -ion, ezért a szénsav –döntően ebben az alakban jelenik meg, könnyen képez kalcium-hidrogén-karbonátot $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Mivel jól oldódik, ezért „kimosódik”. Az elpárolgó víz miatt a felületen „*cseppkövek*” jelennek meg és növekednek.

A karbonátosodás sebessége függ a környezet CO_2 koncentrációjától, a beton átjárhatóságától (permeabilitásától) és nedvességtartalmától (a nedvesség gátolja a gázállapotú CO_2 közvetlen behatolását), a károsodottság fokától, a környezet relatív nedvességtartalmától. A hőmérséklet növekedésével is fokozódik, ha a környezet relatív nedvességtartalma eléri az 50 – 70 % -ot. A karbonátosodás mélysége –jó közelítéssel– az idő négyzetgyökével arányos: 1 és 4 év között megduplázódik, majd ismét megkétszereződik 4 és 10 év között. [10]

3.1.2. A szulfátionok jelenléte, behatolása és ezek következményei: az ettringitképződés

A cementhez gyakran adagolnak gipszet ($\text{CaSO}_4 = \text{Cs}$), részben a klinker orlésének a megkönnyítésére, részben pedig a megkötődés (hidratáció) lassítására. A vezetékes víz is tartalmaz szulfátionokat (mennyiségét az ivóvíz szabvány korlátozza). A talajokban és talajvizekben is ez az egyik leggyakrabban előforduló ion.

A kémia sokirányú fejlődése lehetővé tette, hogy a beton, illetve magának a cementnek a tulajdonságait, kemikáliákkal hatásosan befolyásoljuk, megváltoztassuk. Ismert, hogy a felületaktív képlékenyítők mellett, kiterjedten alkalmaznak kötési- és –gyorsítókat, légpórus-képzőket stb. Sok esetben pedig magának a portlandcementnek az összetételét is megváltoztatják. Ezek közül kiemeljük a viszonylag sok alumínium-oxidot tartalmazó cementek alkalmazását. (Pl. a celit = C_3A gyorsan, és nagy hofejlődés közben hidratálódó klinkerásvány.) Említhetjük még a *heterogén* (= „salakos”) *cementek* térhódítását is [11], amelyek eredetüknél fogva eleve, több szulfátot és alumíniumot is tartalmazhatnak. Ez a tény is bizonyára hozzájárult ahhoz, hogy előtérbe került az ettringit viselkedésének a tanulmányozása. [7, 12-19]

A gyorsan reagáló celit (C_3A) a vízzel (= H) C_3AH_6 , a kalcium-hidroxiddal ($\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CH}$) együtt pedig C_4AH_13 összetételű fázist képez. Szulfátionok, illetve gipsz (Cs) közreműködésével viszont *ettringit* ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{Cs} \cdot \text{H}_32$) is kialakulhat, aminek lebomlásával (is) létrejöhet a kevesebb vizet tartalmazó „*monoszulfát*” ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Cs} \cdot \text{H}_{12}$). [20]

Az *ettringit* képletéből következik, hogy *móltérfogatát a nagy víztartalom határozza meg*, ezért mind keletkezése, mind lebomlása jelentős térfogatváltozással jár. Könnyen belátható, hogy az ettringitet tartalmazó cementkő, illetve beton duzzadt állapotba kerül, majd vízvesztéssel zsugorodik, ami kihat a beton permeabilitására, azaz

⁴ A sav/bázis határon, a hidrogén- és a hidroxidionok koncentrációja azonos ($[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 1 \cdot 10^{-7}$), ezért a *semleges közeg pH-értéke* = 7, mert a $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$.

az oxigén-, a széndioxid-, a víz- és általában az iontranszportjára. Az ettringit képződésére, időben elhúzódva is sor kerülhet, mindenképp az adalék/cementko határfelületi rétegében, vagy zónájában. Ezt nevezi a szakirodalom *elhúzódott ettringitképződésnek* (angol betűszóval DEF).

Az ettringittal kapcsolatos ismeretek összefoglalását és a legújabb eredményeket találhatjuk meg a [7] közleményben. Számos forrásra hivatkozva megállapítják a szerzők, hogy *az ettringit stabilitása erosen függ közegének (az oldatfázis) ionkoncentrációjától, még konkrétan a pH-jától*. A stabilitás alsó határánál a pH=10,7. A szokásos beton oldatfázisának a pH-ja pedig -kezdetben- kb. 13. Ez lehet a magyarázata annak, hogy az ettringit képződésének ugyan adottak a feltételei a friss betonkeverékekben, de keletkezése és jelenléte -a finom eloszlás és kis mennyiség miatt- a legmodernebb eszközökkel (röntgenanalízissel, differenciál-termalízissel, pásztázó elektron-mikroszkóppal) is csak nehezen, vagy egyáltalán nem mutatható ki.

Használat közben az oldatfázis összetételének a változásával, mindenképp pH-jának a csökkenésével, újra képződhet az ettringit. Foként a pórusrendszerben, a fázishatárokon és általában a rácshibák környezetében. A gyakori beázások miatt, különösen a már károsodott betonban, fokozódik az átjárhatóság. A szerkezet „átmosódik”, szó szerint is kilúgozódik. Az elhúzódó ettringitképződésnek, vagyis az ettringit ismétlődő, tehát másodlagos megjelenésének és kikristályosodásának ez a magyarázata.

Megjegyzés: Az Ózd-környéki salakházak meghibásodásainak legfőbb oka éppen az ettringit-képződés, illetve ennek következménye a betonszerkezet gyengülése/roncsolódása (l. nagymértékű repedezés).

3.2. A kloridionok behatolása

Érdekes tapasztalat következménye, hogy a beton készítésekor a „bekevert” klorid mennyisége, a cementre vonatkoztatva, elérheti az 1 %-ot⁵, de a kész betonba később (útsózásból, tenger- vagy talajvízből stb.) behatoló már nem lehet több 0,2 %-nál, sőt a feszített betonok esetében még a 0,1 %-ot sem haladhatja meg. [10] (Magyarázat: a kloridionok döntő többsége kémiaiilag megkötődik a szilárd fázisban és csak kisebb hányada marad oldatban és lesz mozgékony, szennyezi a pórusfolyadékot.)

Érdeemes hangsúlyozni, hogy a kloridionok jelenléte és hatása nemcsak a betonacél korróziója vonatkozásában káros, hanem a betonmátrix egésze szempontjából is, mert a CaCl_2 igen jól oldódó vegyület, ezért nedvesség hatására a kalciumionok kimosódnak, „mobilizálódnak”, következképpen folyamatosan gyengül a beton szilárdsága.

3.3. Az alkáliszilikát-reakció (ASR)

Általános értelemben minden kalcium-szilikát-hidrát (CSH) „*puccolánreakció*” terméke. *Puccolánaktív*nak az olyan természetes eredetű anyagokat nevezik, mint pl. a

⁵ A tengerparti, vagy sóval (általában ionokkal) szennyezett adalékok, és a különféle adalékszerek felhasználásakor is, nagy figyelmet kell fordítani a betonkeverék várható teljes kloridion-tartalmára. (L. a pécsi toronyház 1985-ben nagy feltunést keltett esete.)

trasz (vagy vulkáni tufa, aminek egy része, cc. sósavban kovasavként oldódik), de bizonyos ipari melléktermékek és hulladékok is azok. Az utóbbiakat, főként környezetvédelmi okból, ma elterjedten használják a cement leggyengébb „láncszemének”, a főleg CaO –nak a megkötésére, amikor is járolékos CSH keletkezik. [11, 21, 30] A puccolánaktív anyagok azonban lassítják a beton kötődését és megszilárdulását, aminek az ellensúlyozására megemelik a cement alkálifémoxid-tartalmát. Innen ered az *alkáliakkal aktivált reakció* (AAR) megnevezés, ami egy sajátos változata az alcímben exponált és tágabban értelmezhető alkálszilikát-reakciónak (ASR).

Az alkálszilikát-reakció veszélyessége a képzodo, vízben viszonylagosan jól oldódó alkálifém-szilikátokban rejlik, amely anyagok a jelenlévo víz mennyiségétől függoen, vagy oldatba mennek és idővel kimosódnak a betonból, vagy csak megduzzadnak, ezért mindkét jelenség megnöveli a betonmátrix zsugorodási és repedezési hajlamát.

4. A BETONACÉL-BETÉTEK KORRÓZIÓJA

A betonba ágyazott acél korrózióját –jó közelítéssel– úgy foghatjuk fel, mint az elemi, vagy fémvas oxidációját és oldatba menetelet általában. *Lényeges azonban a különbség a vas „egyszeru” kémiai és az „összetett” elektrokémiai oldódása között.* Mindkettobben oxidálódnak a vas atomjai, tehát elektronokat adnak le, de a folyamat tartóssá válásához a felszabaduló elektronokat, valamilyen anyagnak (ionoknak vagy molekuláknak) folyamatosan el kell használniuk. A „sima” kémiai oldódáskor (pl. sósavban) a fémvas oxidációja és a vas(II)-ion oldatba menetele, azonos ponton zajlik 2 proton elektronfelvételével. A semlegesülő hidrogénionokból, előbb atomok, majd molekulák és végül hidrogéngáz-buborékok keletkeznek.)

Az elektrokémiai oldódáskor az elektronleadás (oxidáció) és az elektronfelvétel (redukció) térben elkülönülve, elektronok és ionok közremüködésével, egymástól legalább 0,4 nm távolságban következnek be. Ekkor a fém felületén, különböző okokból az elozetesen („előélettel” függoen) kialakult, különböző (elektrokémiai) potenciálú helyeket, az iontartalmú víz, mint elektrolit „rövidre zárja” (az áramkör külső részét)⁶, a belső áramkört pedig elektronok zárják, minthogy az anódos helyeken felszabaduló elektronok, magában a fémbe áramlanak a katódos helyekre. Az anódos helyeken tehát vas(II)-ionok (Fe^{2+}) mennek oldatba, a katódos helyeken pedig esetünkben, oxigén és vízmolekulák együtt és egyszerre veszik fel az elektronokat, hidroxidionok keletkeznek ($\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 = 2\text{OH}^-$). Ezek a helyi mikro-, vagy *lokálemek folyamatosan ionokat termelnek*, amelyekből előbb, viszonylag jól oldódó vas(II)-hidroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), és újabb oxidációval, a végtermék, a csaknem oldhatatlan vas(III)-hidroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) keletkezik. Ez utóbbi könnyen vesz vizet, ezért a korrózió terméke, a rozsda –a körülményektől függoen– változó összetételű. (Többnyire mégis csak $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot x \text{H}_2\text{O}$, vagy FeO/OH alakban adják meg.)

⁶ Szabad térben a szilárd anyagok felületén a levegőből kicsapódó (= „szorbeálódó”) víz, *molekuláris méretű réteget képez*, amelyben a széndioxid, különböző összetételű nitrogén- és kénoxid-gázok, mint savanhidridek feloldódnak, majd ionizálódnak, és kiegészülnek a beton ionos szennyezéseivel. Tehát *elektrolit-film jön létre.*

A mikrocellás mechanizmusú korrózió sokkal veszélyesebb a makrocellás, amelyben az acélbetéteknek csak a kisebbik hányada anód, nagyobb részük pedig katód. (A kis helyre koncentrálódó fénoxidáció következménye a lyukkorrózió. Jóllehet, a korrózió teljes folyamatában az acélbetétek összessége részt vesz, legalább is azok, amelyek elektromosan össze vannak kötve, közöttük a fémes (= elektron-) és ionos vezetés miatt, korróziós áramkör jöhet létre.) [30]

A betonban a vas természetes védelmet élvez, amíg a felületén a passzív réteg tönkre nem megy, pl. savanyodás következtében legyengül („elvékonyodik”, l. ózonlyuk), vagy a kloridionok elkezdik „átjárni”, kilyukasztani. Ugyanis a vas(II)-hidroxid a kloridionokkal, vízben jól oldódó hidroxikloro-vas(II)-komplexekké alakul, és miután ezek a komplexek a fém felületről –vízzel– könnyen kimosódnak, a határrétegben pedig elbomlanak. A kloridionok tehát felszabadulnak és kialakul a végtermék, a rozsda, azaz vas(III)-hidroxid. Ezért tudnak a kloridionok ciklikusan részt venni a korrózió fokozásában, amíg a rozsdaiban betemetodve, koncentrációjuk lecsökken, hatástalanná minimalizálódik. Feltétel azonban, hogy utánpótlásuk megszűnjék.

A betonmátrixban belső mechanikai feszültségek gerjednek, mert a rozsda móltérfogata ($[V]=[cm^3/mol]$) erosen függ az összetételtől: $V(Fe=elemi\ vas)=7,11$; $V(FeO)=12,5$; $V(Fe_3O_4)=14,1$; $V(Fe/OH)_2=26,43$; $V(Fe_2O_3)=30,42$; $V(Fe/OH)_3=34,25$; $V(Fe/OH)_3 \cdot 3\ H_2O=44,8$. [23, 24]

A vasbeton-szerkezetekben tehát a rozsda, és ennek feszítő hatása, ugyanúgy a betonmátrix kedvezőtlen átalakulásának a következménye, mint az ettringit szekunder megjelenése a beton mikrorepedéseiben. *Még sem mondhatjuk, hogy akár a rozsda, akár az ettringit, mint következmény, ártatlan lenne, ne fokozná a beton egészének a tönkremenetelét, megrepedezését, felhasadozását és réteges leválását.*

5. A BETONMÁTRIX ÁLLAPOTÁNAK DIAGNÓZISA

Aligha kell bizonygatni, hogy bármely betonszerkezet állapotának hu tükörképe („újlenyomata”) lehet a cementkőbe ágyazott pórusfolyadék összetétele, ezért ennek folyamatos ellenőrzése (monitorozása) ideális lenne. Egyelőre ez megoldhatatlannak látszik.

Hosszú idejű és sokféle tapasztalat alapján azonban mégis lehetne valamit kezdeni azokkal a vizsgálati eredményekkel, amelyeket pl. az összeroncsolt betonminták, desztillált vizes extraktuma kémiai összetételének, pH-jának, pontosan előírt módon való meghatározásával nyerhetünk.

A [25] közlemény részletezi, hogyan lehet hatékonyan elvégezni a hibafeltárást, vagy diagnózist. Már induláskor célszerű eldönteni, hogy (i) rövid, szűkre szabott feltárást akarunk-e, vagy (ii) kello körültekintéssel választunk megoldást a teljes körű felújításhoz.

A [26] közlemény a betonszerkezetű építmények felújítása „szűk határainak” a kibovítéséről ad áttekintést. *Az elore lépést a költségkíméلو, elektrokémiai elveken alapuló, technikai eljárások tették lehetővé.*

6. A FELÚJÍTÁS ÉS GYÓGYKEZELÉS ELJÁRÁSAI: AZ ELEKTROKÉMIAI VISSZALÚGOSÍTÁS ÉS KLORIDKIVONÁS

Manapság nagy figyelmet fordítanak az építőiparban is mindazokra a lehetőségekre, amelyeket az elektrokémiai elveken alapuló, környezetkímélő és tiszta technikák, eljárások és módszerek nyújtanak. [10, 22, 25 és 26]

6.1. Katódos védelem (CP) külső egyenáram-forrással

Ezt a technikát már 1973 óta alkalmazzák ([26] 4. hivatkozása). A vasbeton-szerkezet külső felületére, egy megfelelően rögzített, inert fémlémez, mint anód és a védendő acélbetétek, mint katód között, külső áramforrás segítségével, állandó potenciálkülönbséget hoznak létre, vagyis a betonacélt *katódosan polarizálják*.⁷ Az eljárást új, de agresszív külső (tengeri atmoszféra) hatásának kitett építmények védelmére is használják, vagy amikor a régi épületek elektrokémiai visszalúgosítása, illetve kloridion-tartalmának a csökkentése nem megoldható, vagy sajátosak a körülmények, mint pl. a gyakran sózásnak kitett útfelületek, hidak esetében.

6.2. Galvanikus védelem (GP)

A galvanikus, vagy mártír anódos védelmet már több mint 150 éve alkalmazzák, de csak mostanában használják vasbeton-szerkezetek védelmére is. [26] Más szerzők szerint [22] azonban a betontámfalak védelmére szolgáló cinkbevonatok különböző típusainak a tanulmányozása 1918 –ig nyúlik vissza. *Halstead* a cinkkel bevont („galvanizált”) és 54 évig betonba zárt, tengeri atmoszféra hatásának kitett acélbetéteket vizsgálta és azt állapította meg, hogy a betét rozsdásodása csak néhány, elszigetelődött helyen következett be. Ugyanis a cink-védofilm, mártír fémként, hamarabb oxidálódik, mint a bevont fém (az acélbetét). A keletkező cinkoxid térfogata kb. 50 %-kal nagyobb, mint az elemi cinkké, ezért ez nem idéz elő akkora mechanikai feszültséget, mint a vasrozsdá. Még sem egyértelműen előnyös a galvan-bevonatok alkalmazása. [22] (16. hivatkozás.)

Jobb változat, ha a mártír anódot a betonelem külső felületére, vagy peremére helyezik, és megfelelő áramkört létesítenek a betonacél-betétekkel. Ekkor a mártír anód oxidációjakor felszabaduló elektronok visszaáramlanak az acélbetétekre és ezáltal katódosan polarizálódnak. Ez az eljárás olcsóbb és még önszabályozó is, szemben a külső áramforrást alkalmazó CP -vel.

6.3. A diszkrét galvanánódos védelem (DGA)

A hagyományos (részleges) felújítás kiegészítésére fejlesztették ki ezt az eljárást. [26] Ekkor az egyedi cinkanódokat, speciális habarcsba ágyazzák be, és ezzel azt érik el, hogy a cinkdarabok tartósan aktívak maradnak. Az eljárást a részlegesen

⁷ A vas elektrokémiai egyensúlyi potenciálja és a közeg - pH -ja függőségét szemléltető, ún. Pourbaix-féle diagram tanúsága szerint, a mintegy – 0,5 V-nál negatívabb („katód”-) potenciál alatt a vas termodinamikailag stabilis, azaz a korrózióval szemben, immúnis állapotban van. [27]

felújított betonelemekben ajánlják alkalmazni, ahol az acélbetéteket katódosan polarizálják, és meggátolják a betétek korrózióját.

6.4. Az elektrokémiai kloridkivonás (ECE)

Ezzel az eljárással a betonmátrix kloridion-koncentrációját, a korróziót gerjesztő szint alá lehet csökkenteni. Ekkor is –átmenetileg- külso, inert és elektrolitba ágyazott - anódot helyeznek a védendo betonelem peremére és a betonacél-katóddal áramkört létesítve, külso egyenáram-forrásból, tipikusan 1 A/m^2 suruségu egyenáramot hajtanak át. Ekkor a betonacél, a negatív töltésu kloridionokat taszítja, miáltal mozgásba jönnek és a külso anód felé áramlanak. Eközben a felületen semlegesülo hidrogénionok, hidroxidionokat hagynak hátra, következésképpen a betonacél környezete visszalúgosodik, a kloridionok koncentrációja pedig lecsökken. (A külso elektrolit-tartályban gyulnek össze.) Elektrolízis közben, idoszakosan be- és kikapcsolják az áramot és az anód elektrolit-tartályában frissre cserélik ki az elektrolitot.

Miután a tervezett árammennyiséget áthajtották, a Cl⁻ ionok koncentráció-változását meghatározzák. (A kloridion-analízist l. BS1881: Part 124, vagy AASHTO T260.)

6.5. Az elektrokémiai visszalúgosítás (ERA)

Hasonlóan járnak el, mint a 6.4. pontban leírt kloridion-kivonás esetében, vagyis itt is külso anódot alkalmaznak. Ekkor az elektrolittartályba káliumkarbonát-oldatot öntenek. Most a betonacél felé káliumionok vándorolnak, de ott helyettük a víz hidrogénionjai redukálódnak és a hátra hagyott OH⁻ ionok visszalúgosítják a határreteget, miközben a karbonát (és más anionok) a külso anód felé áramlanak és összegyulnek az elektrolittartályban, mert az anódon az OH⁻ ionokból, elektronleadással oxigénmolekulák keletkeznek. 7 – 10 napos elektrolízis után, a határretegben az oldatfázis pH – ja tipikusan, 10,5 – rol 11,5 – re, vagy még magasabb értékure változik.

Figyelmeztetés: Itt is, mint minden esetben, amikor hidrogén - és oxigéngáz fejlődésével (= durranógáz-elegy keletkezésével) lehet számolni, rendkívül körültekintoen kell dolgozni! (L. pl. ólom- vagy savas akkumulátorok elektromos feltöltése.)

7. A BETEGSÉGEK MEGELOZÉSE NAGYTELJESÍTMÉNYU BETONOK ALKALMAZÁSÁVAL

A század- és ezredfordulón senki sem foglalkozhat úgy betonnal, hogy ne törodjék annak tartósságával. (L. a környezeti károsító hatások fokozódása: ózonlyuk, savas eso, ipari, mezogazdasági és kommunális szennyezés stb.) Ennek nyomán az utóbbi évtizedekben kialakult „betonkrízis” intenzív kutatómunkára ösztönzött világszerte. Számos történelmi forrás és példa felhasználásával azonban mégis arra lehetett következtetni, hogy a beton roncsolódása nagy hasonlóságot mutat a természetes köveknek az idójárás következtében fellépo „geológiai” átalakulásával. [28]

7.1. A cementko és a beton leggyengébb “láncszeme”, a CaO [4, 11, 29, 30]

A 3.3. fejezetben utaltunk már arra, hogy a portlandcement (PC), illetve az ebből keletkező cementko (és beton) leggyengébb láncszeme a kalcium-oxid, szakszerűbben (kémikus nyelven kifejezve pedig a gélképződés és megszilárdulás után, inkább) *a kalcium-hidroxid* (Ca/OH_2), ami túlnyomóan a pórusrendszer folyadékában gyulik össze, és a vízben sokkal jobban oldódó alkálifém-hidroxidokkal együtt lesz „*a pórusvíz*” *legfőbb jellemzője*. (Nedvesség behatására ennek felhígulásával, illetve kimosódásával és kilúgozódásával lehet számolni.) A hagyományos portlandcementek esetében a CaO-fölösleg mintegy 10-20 %. [4, 29]

Nem szabad azonban elfelejteni, hogy sok évtizedes tapasztalat kellett ahhoz, hogy az összetétel „optimalizálódjék”. Ennek nyomán standardizálták a PC-t. Az ásványi fázisok kalcium-oxid fölöslege, a szilikátokhoz képest (l. előbb is) eredményezi azt, hogy a felszabaduló hidratációs hő, egyrészt –gyakorlati szempontból– elfogadható sebességűvé teszi, mintegy beszabályozza a cementgél és –ko kialakulását, másrészt az adalékszemek, de foként –szemcsék felületén, reakcióképes állapotba hozza, „aktiválja” az alvó, terminális –Si-OH –csoportokat. Tehát ezekből is oxigénhidas –Si-O-Si-, illetve –Si-O-Ca-O-Si- kötések alakulnak ki, vagyis beton jön létre. És mint láttuk, a beton „természetes” pH-ja (kb. 13) is ennek köszönhető. Tehát ebben a nagyon összetett és térben erosen gátolt, heterogén rendszerben, elegendő idő kell ahhoz, hogy a reaktánsok –mindenekelőtt– *a kalcium-hidroxid és a reaktánsvíz (az oldószervíz segítségével) eljussanak a CSH-kialakulás gócaira, vagy helyeire*, vagyis hogy egyenletesen eloszolhassanak a betonkeverék egészében, tehát „homogenizálódhassanak”, miáltal mindig és egyértelműen, az elvárt szerkezet jöjjön létre, aminek elemi feltétele természetesen egy optimális molekuláris felépítés.

7.2. A járulékos CSH-képződés és a különféle mikroszilikátok kapcsolata

A mikroszilikátok (= „mikroszilika”), vagyis a puccolántulajdonságú anyagok sokfélesége ismert, amelyek legfőbb jellegzetessége, hogy nagy, vagy legalább is jelentős az „aktív kvarc”-tartalmuk. Származásukat illetően *lehetnek természetes- (traszok) és mesterséges eredetűek*. Ez utóbbiak példái: a szilikapor, ami a vas- és acélöntéseknél használt öntohomok maradványa, vagy bányahomok zúzásával/orlésével nyert, igen nagy fajlagos felületű, „vegytisztá” finomkvarc, szilikátpernye (silica fume), szénpernye, amely lehet szállópor (fly ash), vagy kemencefenék-hamu (bottom ash) és orölt kohósalak (ground granulated blast-furnace slag). A legfontosabb jellemzőjük, hogy nagy fajlagos felületűek és nagyon sok terminális –Si-OH –csoportot tartalmaznak, ezért a betonkeverékben –hidratáció közben– megkötik a szóban forgó „föls” kalcium-hidroxidot, vagyis a cement ásványi fázisaihoz hasonlóan, kalcium-szilikát-hidrátokat képeznek, amely utóbbiak *mintegy járulékos CSH-nak tekinthetők*. [30]

A mikroszilikátokkal készített beton azért lehet szuper (nagyteljesítményű és nagy szilárdságú), mert egyrészt v/b-tényezőjét eleve kicsi (0,28-0,34 körüli) értékűnek választják, másrészt rendkívül tömör, ahol b az összes bekevert hidraulikus, cementáló

tulajdonságú anyag mennyiségét jelöli. Következésképpen az ilyen beton átjárhatósága (= permeabilitása”) jelentősen lecsökken. [29, 30]

Nyilvánvalóan az lenne az optimális, ha a bekevert aktív kvarc teljes egészében átalakulna járulékos CSH-tá, de ez sok mindentől függ [31]. Az eredetileg főleg mennyiségű kalcium-oxid/hidroxid megkötését követően, a maradék aktív kvarc szemcsék „finom adalékként” lesznek részei a betonszerkezetnek. (Orótségi fokuktól függően, a szemcsék részben, vagy teljesen átgélesednek, ezért sokkal jobban feltapadnak az adalékszemek durva és érdes felületére, mint a hagyományos cement szemcséi, vagyis *jobb minőségű cementenyvként* hatnak. Következésképpen az ilyen betonmassza mozgékonyabb, jobban tömörödik, minthogy az adalékszemek könnyebben elcsúsznak és mozdulnak el egymástól. L. még öntömörödő beton [32].)

7.3. A betonok átjárhatósága (permeabilitása)

Könnyen belátható, hogy a megszilárdult beton tartósságát nagymértékben befolyásolja tömörsége, vagy átjárhatósága. Hiszen a környezet károsító hatásai, mindenekelőtt a nedvesség és az agresszív anyagok/ionok, illetve molekulák, mint pl. a klorid- és szulfátionok, vagy az oxigén- és a széndioxid-molekulák behatolása mértékétől függenek.

Az 1. táblázat különböző betonok effektív diffúziós együtthatóit (D , m^2/s) tartalmazza, amely adatokból kitűnik, hogy milyen mértékben függ a semleges oxigénmolekulák és a negatív elektromos töltésű kloridionok diffúziója a betonok minőségétől. [33, 30]

A táblázatból kiolvasható, hogy a nagy tömörségű mikrobetonban az oxigénmolekulák effektív diffúziós együtthatója 1 nagyságrenddel kisebb, mint a hagyományos betonban. Még fontosabb azonban, hogy a kloridionok esetében ez az eltérés már 2 nagyságrendet ér el. A magyarázat kézenfekvőnek látszik: a térbeli szilikátrács negatív elektromos töltésburka és az ezt kompenzáló, részlegesen még mindig gyengén (parciálisan) pozitív töltésű kalciumionok egyaránt fékezően hatnak a negatív töltésű kloridionok mozgására. Szemben az oxigénmolekulák esetével, amikor ez a fékezés már nem lehet ennyire jelentős. (Különösen az acélbetétek korróziója szempontjából fontos ez a markáns eltérés.)

1. táblázat: Az oxigénmolekulák és a kloridionok effektív diffúziós együtthatója (D , m^2/s) különböző betonokban [33]

Hagyományos betonban		TR31 betonban*		Mikrobetonban	
O ₂	Cl ⁻	O ₂	Cl ⁻	O ₂	Cl ⁻
21.10 ⁻⁸	5.10 ⁻¹²	5.10 ⁻⁸	1.10 ⁻¹²	2,1.10 ⁻⁸	1,2.10 ⁻¹⁴
Megjegyzés: * UK Concrete Society Technical Report szerint definiált 31. sz. beton					

Aligha nem tanulságos röviden kitérni még egy friss közlemény ide vonatkozó megállapításaira is. [34]

E szerzők (ugyanúgy, mint a [33] cikké) megállapítják, hogy a beton karbonátosodásának a becsléséhez is alapvető fontosságú lenne ismerni a széndioxid diffúzióját is a betonban. Ezeket az adatokat azonban, közvetlen kísérleti úton nem lehet

meghatározni. Ti. a betonban a széndioxid túlnyomóan nem gázhalmazállapotú, hanem kisebb részben fizikailag oldott, de mégis semleges molekulaként, nagyobb részben azonban kémiaiilag átalakulva, negatív töltésű anionként (CO_3^{2-} , és nagyon ritkán esetleg, HCO_3^- alakban) mozog. Ráadásul *a beton reaktív közeget jelent a széndioxid ezen előfordulási alakjai számára!*

A szerzők nagyon szemléletesen utalnak arra is [34], hogy a betonban a transzport részben a fázishatárokon, részben pedig levegővel, vagy pórusfolyadékkal kitöltött pórusrendszeren át zajlik, illetve következik be. *Következésképpen a molekulák és ionok diffúziója, igen nagy mértékben függ a beton mindenkori nedvességétől.* „Gázként” csakis a száraz betonban tud a széndioxid-molekula mozogni! Mindezek ellenére, minkét közlemény szerzői elfogadják az oxigénmolekulára érvényes adatok extrapolálását, vagyis a szóban forgó cikkekben nem részletezett „átvitelét” a széndioxid-molekulákra.

A [34] közleményben még a következő –meglepo- megállapítás is olvasható (l. 141. oldal utolsó sora): „... a betonba behatoló kloridionok gyorsabban mozognak, mint az őket kísérő nátriumionok...” Általánosan ismert ugyanis, hogy az ellentétes töltésű, és eltérő méretű ionok, rendkívül rövid idő alatt, azonos (átlagos) sebességet érnek el, akár egyszerű diffúzióról, akár elektromos erőtér hatására történő ionvándorlásról van szó.

Ne feledjük, hogy a kalcium-klorid rendkívül jól oldódó vegyület, és keletkezésével mobilizálódik a beton (a kloridionok elektrosztatikus erőkkel „elszívják” a rácsközi helyeken eredetileg megkötött, kalciumionokat is).

Utalnunk kell még arra is, hogy az anyagtranszportban a kapilláris erők fellépése a pórusokban is jelentős tényező lehet, különösen, ha a nedvességtartalom ingadozik.

8. KÖVETKEZTETÉSEK

Igyekeztünk rámutatni arra, hogy hogyan segíti elő a kémiai (molekuláris) szemléletmód a vasbeton-szerkezetek keletkezésékor és ezt követően is, a használat közben lezajló fizikai és kémiai folyamatok megértését, továbbá hogyan lehet a már károsodott szerkezeteket költségkímélő, kevésbé környezetszennyező, vagy éppen tiszta *elektrokémiai technikákkal, eljárásokkal felújítani. Adott esetekben (l. hidak, utak) pedig már eleve alkalmazni, pl. a katódos védelmet.*

A hivatkozott forrásmunkák eredményeit úgy kíséreltük összefoglalni, hogy jól érthető legyen, pl. a cementkő (beton, habarcs stb.) lényegét kifejező hidratált fázisok, a kalcium-szilikát-hidrátok (CSH) keletkezése és mibenléte.

A beton molekuláris szintű felépítésének a felvázolása bizonyára jobban érthetővé teszi, miért okoznak kárt már eleve, de különösen behatolás után, a rácsidegen anyagok, különösképpen pedig az idegen ionok.

Jóllehet, már eddig is nagy figyelmet fordítottak a víznek a beton kialakulásában és tartósságában betöltött közvetlen és közvetett szerepére, de talán még sem haszontalan nyomatékosítani ennek bonyolultságát és összetettségét. Hiszen a víz nemcsak reaktáns és termék, hanem egyben oldószer és közeg is: Az anyagok és a hőtranszportjában, a koncentrációk, a hőmérséklet, a nyomás és az ozmózis nyomás kiegyenlítésében, valamint a kapilláris erők érvényesülésében játszott fontos és

sajátos szerepe aligha nem sokkal nagyobb figyelmet érdemel, mint eddig. A víz jelenlétének változó minőségei és mennyiségei, az utólagosan megjelenő formái (tisztán vagy szennyezett) és „eltünései”, közvetlenül is belső feszültségeket gerjesztenek, illetve repedésekhez vezetnek. A vasbeton-szerkezet egészében bekövetkező ki- és átalakulási folyamatokban, változásokban tehát mind közvetlenül, mind közvetve (a rozsda – és az ettringit képződésében, az elsavanyodásban, karbonátosodásban, a különféle anyagok kimosódásában, vagy a kilúgozásban, a kloridionok agresszivitásának az érvényesülésében) meghatározó a szerepe. A betonra jellemző állandó mobilitás okozója. „Pórusvízként” pedig mint valamiféle ujjlenyomat, hűen tükrözi a beton mindenkori állapotát.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

A muszaki és a természettudományok nagyléptéku fejlődése, de különösen az anyagtudományok kialakulása és eszközeinek elterjedése, hatalmas lendületet adott az építőiparnak, valamiféle újjászületésének lehetünk tanúi. Ennek egyik látványos eredménye az építő vegyi anyagok tömeges megjelenése és elterjedése, sokféle és sokcélú alkalmazása, illetve kihasználása.

Miközben a fejlődést az iparág vezetői és oktatói igyekeznek követni, valamiféle fokozódó elvárás nyilvánul meg az új építő anyagok és eljárások megismerése, megértése és szakszerű kezelése, körültekintőbb használata iránt.

A szukszavú, olykor félrevezető, netán csak megtévesztő gyártmányismertető, szórólapok szerzői biztosan titoktartásra kényszerülnek. De talán még ettől függetlenül is, segítené a jobb eligazodást, a vonatkozó kémiai ismeretek és általában, a kémikus gondolkodási mód elsajátítása.

Ebben a tanulmányban a hagyományosan épített vasbeton-szerkezetek károsodásának okaival és felújításának lehetséges megoldásaival foglalkoztunk. Felvázoltuk azt is, hogy miért elonyós a nagyteljesítményű és nagy szilárdságú, szuper betonok alkalmazása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dolgozat a T32 055 OTKA támogatásával készült, melyért a szerző köszönetét fejezi ki.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Clark, L.: Concrete Education in a changing world. *CONCRTE*, January 2000, pp. 24-25
- [2] Greenwood, N. N., Earnshaw, A.: *Az elemek kémiája, I. kötet*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Bp. 1999, pp. 459
- [3] Baes, C. F., Mesmer, R. E.: *The Hydrolysis of Cations*. J. Wiley & Sons, New York, 1976, pp. 337

- [4] West, A. R.: *Solid state chemistry and its applications*. J. Wiley & Sons, New York, 1985, pp. 639
- [5] McCurrich, L. H., Decter, M. H.: Refurbishment of structures using new-generation flowing microconcrete (Praper presented at 'Concrete'95 –Concrete Institute of Australia/FIP International Conference, Brisbane, Australia: 4-7 September 1995)
- [6] Balázs Gy.: *Építőanyagok és kémia*. Muegyetemi Kiadó, Bp. 1994, pp. 53
- [7] Stark, J., Bollmann, K.: Ettringitbildung im erhalteten Beton –ein oder kein Problem? *Beton und Stahlbetonbau*, 95 (2), 104 (2000)
- [8] Constantiner, D., Diamond, S.: Pore solution analysis: are there pressure effects? *Mech. Chem. Degrad. Cem.-Based Syst.*, Proc. Mater. Res. Soc. Symp. 1997, pp. 22-29
- [9] Constantiner, D., Diamond, S.: Fixation of alkalis in cement pore solutions, mint [8], de pp. 67-74
- [10] Parker, J.: Carbonations and chlorides in concrete. *CONCRETE*, September 1997, pp. 18-20
- [11] Révay, M., Opoczky L.: A HCM Rt. által gyártott trassz- és kompozit portlandcementek néhány jellemzo tulajdonsága, *BETON VII* (1), 3 (1999)
- [12] Casanova, I. et al.: Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – II. *Physico-chemical modeling of sulfate attack*. Chem. Concr. Res. 27 (11), 1627 (1997)
- [13] Adams, L. D.: Ettringite, the positive side. *Int. Conf. Microsc* 1997, 19th, 1-13
- [14] Herfort, D. et al.: Mineralogy of sulfate rich klinker and the potential for internal sulfate attack, mint [13], de pp. 64-85
- [15] Thaulow, N. et al.: What causes delayed ettringite formation? Mint [8], de pp. 219-226
- [16] Ishida, A. et al.: Expansive behavior of slag cement with expansive additives. *Proc. Int. Congr. Chem. Cem.*, 10th, 1997, 3, 3iii017, pp. 8
- [17] Michaud, V. et al.: Experimental simulation of stability of ettringite in alkali silica solutions, produced bt alkali-silica reaction in concrete. Mint [16], de 1997, 4, 4iv065, pp. 9
- [18] Skalny, J. et al.: DEF: a form of sulfate attack. *Mater. Constr. (Madrid)* 46 (244), 5 (1996)
- [19] Colleparđi, M.: Damage by delayed ettringite formation (DEF), *CONCRETE INT.*, January 1999, pp. 69-74
- [20] Mint [6], de pp. 221
- [21] Szalay T., Szalai K.: A vasbeton korrózióállósága (I). A víz és a mikroszilika a korrózióvédelemben. *BETON VI* (4), 3 (1998)
- [22] Emmons, P. H., Vaysburd, A. M.: Corrosion protection in concrete repair: myth and reality. *CONCRETE INT.* March 1997, pp. 47-56
- [23] D'Ans*Lax: *Taschenbuch für Chemiker und Physiker*. Springer, Berlin, 1967. Dritte Aufl. Band I, I-336
- [24] Bürge, T. A.: The role of corrosion inhibitors in high performance concrete. *FIP Symp. '97, Johannesburg*, 659-666 (* ennek 1. ábrájából interpolált értékek)
- [25] Grantham, M.: Diagnosis of car park defects to ensure effective repairs. *CONCRETE*, November/December 1999, pp. 22-24

- [26] Haboubi, L.: Extending the boundaries of concrete repair – an electrochemical approach to cost-effective durability. *CONCRETE*, January 2001, pp. 50-53
- [27] Kiss L.: *Az elektrokémia alapjai*. Muszaki Könyvkiadó, Bp. 1983, pp. 138
- [28] Roy, D. M., Jiang, W.: Concrete chemical degradation: ancient analogs and modern evaluation. *Mech. Chem. Degrad. Cem.-Based Syst.*, Proc. Mater. Res. Soc. Symp. 1997, pp. 14-21
- [29] Farkas Gy., Szalai K.: A szuperbeton, betontechnológiai korszakváltás. (A *BETON ÉVKÖNYV* 2000, 7. fejezete.) MÉASZ, Bp. 1999. pp. 138-154
- [30] Szalay T.: A betonszerkezetek lehetséges károsodásai. Mint elobb, de 10. fejezet, pp. 174-187
- [31] Újhelyi J.: Vitairat. *BETON* VIII (3), 21 (2000)
- [32] Grube, H., Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton = Self compacting concrete – another stage in the development on the 5-component system of concrete. *BETON* 49 (4), 239 (1999)
- [33] McCurrich, L. H., Decter, L. H.: Refurbishment structures using new-generation flowing microconcrete. (Paper presented at 'Concrete'95 Concrete Institute of Australia/FIP Int. Conf., Brisbane, Australia, 4-7 September 1995)
- [34] Steffens, A., Dinkler, D., Ahrens, H.: Modellierung und numerische Analyse von Karbonatisierung und Chloridbindung in Betonbauteilen. *BETON – und STAHLBETONBAU* 96 (3), 138 (2001)