

Diplomamunka

2013/2014 I. félév

Vasbeton szerkezetek állapotromlásának elemzése



Készítette: Czoboly Olivér Attila
MDYFQT

Konzulensek: Dr. Balázs L. György, egyetemi tanár,
Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva, adjunktus,
Zimmer Péter, okl. mérnök, főmunkatárs

Budapest, 2013. 12. 09.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	4
2. LEHETSÉGES LEROMLÁSI FOLYAMATOK ÁTTEKINTÉSE	8
2.1. Szulfátos víz és kénhidrogén okozta duzzadásos betonkorrozó.....	8
2.2. Oldódásos betonkorrozó	13
2.3. Alkáli-adalék reakció	17
2.4. Fagy hatására bekövetkező betonkorrozó	19
2.5. Koptatás hatására bekövetkező betonkorrozó	25
2.6. Biológiai károsító hatások.....	28
2.7. Karbonátosodás okozta acél korrozó	29
2.8. Kloridion-tartalom okozta acélkorrozó	36
2.9. Repedések hatása a leromlási folyamatra.....	41
3. LEROMLÁSI FOLYAMATOK BEMUTATÁSA ÉS ELEMZÉSE SAJÁT VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ALAPJÁN	46
3.1. Sentab típusú nyomócsöveket érő környezeti hatások	46
3.2. Sentab csöveken elvégzett vizsgálatok	49
3.2.1. Szemrevételezéses állapotfelmérés	49
3.2.2. Betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése.....	50
3.2.3. Karbonátosodási mélység ellenőrzése.....	52
3.2.4. Kloridion-tartalom vizsgálata nedves analitikai módszerrel	52
3.2.5. Betonfedés megbontásával elvégzett vizsgálatok	53
3.2.6. Furatpor minta elemzése fázisanalitikai módszerrel	53
3.2.7. CT vizsgálat és kiértékelése	55
3.3. Sentab csövek állapotromlásának elemzése a vizsgálati eredmények alapján	57
3.3.1. Betonkorrozó lehetőségének vizsgálata Sentab csövek esetén	57
3.3.2. Acélkorrozó vizsgálata Sentab csövek esetén.....	57
3.3.3. Sentab csövek állapotromlásának elemzése	62
4. LEROMLÁSI FOLYAMATOK BEMUTATÁSA TOVÁBBI GYAKORLATI PÉLDÁKON	69
4.1. Szulfátos víz és gáz okozta betonkorrozó	69
4.2. Oldódásos betonkorrozó	71
4.3. Alkáli-adalék reakció	72
4.4. Fagy hatására bekövetkező betonkorrozó	74
4.5. Koptatás hatására bekövetkező betonkorrozó.....	75

4.6. Biológiai károsító hatások.....	76
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	77
6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	79
7. HIVATKOZÁSOK	80
8. NYILATKOZAT	86
MELLÉKLET	87
M.1. melléklet: Sentab csőelemek jellemzői.....	87
M.1.1. melléklet: Sentab csövek típusai.....	88
M.1.2. melléklet: Sentab csövek gyártástechnológiája	89
M.1.3. melléklet: Sentab csövek gyártás során és beépítéskor végzett ellenőrzései.....	94
M.1.4. melléklet: Sentab csövek korrózióvédelme	98
M.2. melléklet: Csöveken észlelt hibahelyek és az elvégzett vizsgálatok helyei.....	99
M.3. melléklet: Szemrevételezéskor tapasztalt rozsdafoltok a csövek felületén.....	101
M.3.1. melléklet: Bütüs felületen tapasztalt rozsdafolt.....	101
M.3.2. melléklet: Zsaluillesztés környezetében tapasztalt rozsdafoltok	101
M.3.3. melléklet: Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzásánál jelentkező rozsdafoltok	102
M.3.4. melléklet: Cső palástján észlelt rozsdafoltok.....	103
M.4. melléklet: Betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése Schmidt-kalapáccsal vizsgálattal.....	106
M.5. melléklet: Vizsgált furatpor minták kloridion-tartalma és pH értéke	108
M.6. melléklet: Betonfedés megbontása alapján tapasztalt hibaokok.....	110
M.6.1. melléklet: Bütüs felületen tapasztalt rozsdafolt feltárása	110
M.6.2. melléklet: Zsaluillesztés környezetében tapasztalt rozsdafolt feltárása.....	111
M.6.3. melléklet: Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzásánál jelentkező rozsdafolt feltárása	111
M.6.4. melléklet: Cső palástján észlelt rozsdafoltok.....	112
M.7. melléklet: Betonfedés nagysága	114
M.8. melléklet: Furatpor minták elemzése fázisanalitikai módszerrel.....	116
M.8.1. melléklet: Röntgendiffrakciós vizsgálat	116
M.8.2. melléklet: Derivatográfiás vizsgálat	117

A címlapon látható képet az egyik Sentab típusú cső vizsgálata közben készítettem, amin a feszítőhuzal korróziója látható a betonfedés eltávolítását követően.

1. BEVEZETÉS

A beton, illetve vasbeton alkalmazása napjainkra általánossá vált. A betontechnológia fejlődésének köszönhetően majdnem minden szerkezetet el lehet készíteni beton felhasználásával.

A jelenlegi civilizációnk szinte elképzelhetetlen beton, illetve vasbeton alkalmazása nélkül. Betont, illetve vasbetont használunk épületeink, úthálózataink, gyáraink, hidaink, gátjaink, alagútjaink, erőműveink, csőhálózataink építéséhez. 2008-as adatok alapján a Földön évente hozzávetőlegesen 7 milliárd tonna betont állítanak elő [Spránitz, 2008].

A beton, illetve vasbeton óriási felhasználása részben azzal magyarázható, hogy kellő szilárdsággal rendelkezik és emellett olcsón, nagy mennyiségben és egyszerűen előállítható. Emellett lúgos kémhatásának köszönhetően védelmet nyújt a benne levő acélok (acélbetétek) számára a korrózióval szemben. Az egyszerű előállíthatóság azonban nem jelenti azt, hogy nem igényel szakszerű tervezést, kivitelezést, illetve üzemeltetést a szerkezet.

Kezdetben a beton, illetve vasbeton szerkezeteket elsősorban a kellő szilárdság biztosítására tervezték. Az elkészült szerkezetek vizsgálatából nyert tapasztalatok alapján megfigyelték, hogy állapotuk romlik az élettartamuk során. Az állapotromlás mértéke sok tényezőtől függhet. A szerkezetek állapota szempontjából fontos az eredetileg elkészült beton minősége, összetétele, emellett azonban nem mellékesek a szerkezetet érő környezeti hatások, terhek fajtája, illetve azok gyakorisága sem.

Számos gyakorlati tapasztalat igazolta, hogy kizárólag teherbírásra tervezett, de koptató hatásnak is kitett betonok tartóssága nagyon rövid volt (esetenként néhány nap). Ennek magyarázata, hogy gyakran a teherbírás szempontjából meghatározott szilárdsági követelmény kisebb, mint a szerkezetet érő koptató hatás elviseléséhez szükséges követelmény [Ujhelyi, 2005].

Napjainkban már a tervezés során igyekeznek olyan szerkezeteket kialakítani, melyek kellő tartóssággal rendelkeznek a várható környezeti hatásokkal szemben is.

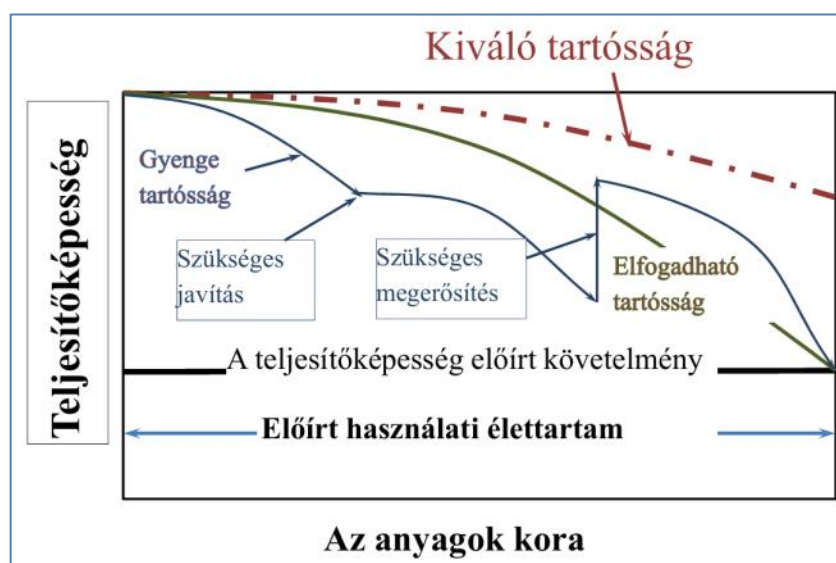
Az MSZ 4798-1:2004 betonszabvány (az MSZ EN 206-1:2002 honosított európai szabvány magyar nemzeti alkalmazási dokumentuma), illetve maga az MSZ EN 206-1:2002 szabvány is a beton, vasbeton, feszített vasbeton szerkezetek betonját a várható környezeti hatások alapján környezeti osztályokba sorolja, illetve meghatározza az adott környezeti osztályba tartozó betonok tulajdonságainak határértékét. Többek között a minimális betonszilárdságát, minimális cementtartalmát, maximális v/c tényezőjét, a frissbeton és a kiszáritott beton minimális testsűrűségét [Kausay, 2011].

Ez azonban nem azt jelenti, hogy a tervezett környezeti osztályoknak megfelelően elkészített szerkezeteknél nincs szükség az üzemelés közbeni megfelelő

karbantartásokra. Megfelelő üzemeltetés, karbantartás hiányában a szerkezet teljesítőképessége az előírt minimális szint alá csökkenhet.

A szerkezetet érő hatások, igénybevételek a tervezetthez képest megváltozhatnak, melyek intenzív állapotromlást eredményezhetnek. A nem tervezett környezeti hatások következtében a szerkezeti elem állapota rövid időn belül jelentősen leromolhat, így beavatkozások nélkül nem lesz képes megfelelően ellátni a feladatát. Esetleg a rossz állapotú szerkezet üzemzavart, vagy balesetet is okozhat.

Az 1.1. ábrán látható, hogy egy gyenge tartósságú szerkezet esetén szükség lehet javításokra, megerősítésekre ahhoz, hogy a szerkezet megfelelő teljesítőképességgel rendelkezzen az előírt használati élettartama során.



1.1. ábra: Szerkezetek teljesítőképességének változása javítás, illetve megerősítés hatására [Nehme, 2013]

Jól szemlélteti a beton, illetve vasbeton szerkezetek karbantartásának fontosságát, hogy Európában az infrastrukturális jellegű beton- és vasbetonszerkezetek javítására évente több mint 100 milliárd Eurót költenek [Spránitz, 2008]. Nem is beszélve arról, hogy mekkora költséget jelent a magasépítési, illetve mélyépítési beton, illetve vasbeton szerkezetek karbantartása.

Világszerte nagy mennyiségben felhasznált beton, illetve vasbeton megfelelő használhatóságához fontos ismerni a szerkezeteket érő környezeti hatások miatt bekövetkező leromlási folyamatokat és elemzéséhez elvégezhető állapotvizsgálati lehetőségeket. Ezek ismerete szükséges ahhoz, hogy az adott szerkezet jelenlegi állapotát, illetve várható élettartamát meg tudjuk határozni.

Diplomamunkámban röviden áttekintem a vasbeton szerkezetek tipikus leromlási folyamatait, majd a Sentab típusú csövek példáján keresztül mutatom be annak vizsgálatát, elemzését.

Hazánkban (a BVM szentendrei gyárában) 1969-1988 között összesen mintegy 360 km hosszúságban készültek (különböző átmérővel) Sentab típusú, nagy átmérőjű, feszített vasbeton nyomócsövek. 1997-es adatok alapján Budapest területén 121 142 fm Sentab típusú feszített vasbeton cső volt [Zimmer – Kereszturi, 1997], Pócsmegyeren 620 fm, míg Szigetszentmiklóson 9 770 fm Sentab cső került beépítésre [Balázs, 1995].

Budapest vonzáskörzetén kívül több településen is alkalmaztak Sentab típusú csöveket. A Dunántúli Regionális Vízmű Zrt. Mohácsi Üzemvezetőségéhez 32 332 fm teljes szakaszhosszúságú, 1000 mm átmérőjű Sentab típusú cső tartozik [Drescherné, 2004], míg Szegeden hozzávetőlegesen 13 000 fm hosszúságban építettek be 1000 mm átmérőjű Sentab típusú csövet [sulinet.hu]. Pécs környéki közműhálózat részeként ivóvíz ellátásban 979 fm, míg csatornahálózatban 1 372 fm Sentab cső volt beépítve 2011-ben [Fürtös, 2011].

Mivel a csőhálózat földdel, illetve valamilyen burkolattal takart, így komoly problémát jelent a csövek állapotvizsgálata. Legtöbb esetben csak a feltárt csőszakaszok vizsgálatából lehet következtetni a környező csőszakaszok állapotára. Mivel a feltárások akadályozzák a forgalmat, és emellett komoly anyagi vonzatuk is van, így törekedni kell a lehető legkevesebb feltárás elvégzésére. A feladatot tovább bonyolítja, hogy a feltárt csőszakaszok legtöbbször üzem alatt vannak, így akár 8-10 bar víznyomás is lehet bennük.

A csőhálózatokban a Sentab típusú csövek nagy (500-1200 mm) átmérőjének köszönhetően általában a gerinchálózat részeként alkalmazták, így stratégiai fontosságú a meghibásodásuk elkerülése. Az ivóvíz-ellátás megzavarásán túl, egy csőtörés jelentős anyagi károkat okozhat, vagy esetleg emberéletet is veszélyeztethet.

Zimmer és Kereszturi [1997] publikációja nagy számú meghibásodásról, tönkremenetelről számol be a Sentab csövek kapcsán már 1997 előtt is.

Egy csőtörés súlyosságát szemlélteti egy 2012 nyarán bekövetkezett csőtörés, amikor egy 1000 mm átmérőjű Sentab típusú cső héjkitörése következett be, mely jelentős károkat okozott. A tönkrement cső környezetében mintegy 15 méter átmérőjű, több méter mély gödör keletkezett. Az útburkolat darabjait 20-50 méterre sodorta el a víz. A víz helyenként térd magasságig állt a környező utcákban (1.2. ábra), és bejutott a környező lakóházak pincéjébe és egy építés alatt álló földalatti létesítménybe is [mno.hu, 2012].

A BVM-Sentab Műszaki Előírás [Mester, 1978] 54. oldala alapján „A Műszaki Előírásnak megfelelő minőségű csövekből és idomokból ugyancsak a Műszaki Előírások szerint, szakszerűen fektetett vezeték élettartama 50 év”. A csövek gyártási évét figyelembe véve még a tervezési élettartamon belül vannak a beépített csövek. Fontos látni azonban, hogy az első (1969-ben) beépített csövek tervezési élettartama 2019-ig tart.



1.2. ábra: Sentab csőtörés következménye 2012 nyarán [mno.hu, 2012]

Ez természetesen önmagában nem jelenti azt, hogy 2019-től azokat a csöveket tönkrementnek kell tekinteni. Kausay Tibor „Beton, a betonszabvány néhány fejezetének értelmezése” című könyvében [Kausay, 2013] egyértelműen kimondja, hogy a tervezési élettartam és a használati élettartam között óriási különbség van:

„A tervezési élettartam követelmény (előírás), míg a használati élettartam tényleges, tapasztalati érték. A tartós beton használati élettartama nagyobb, vagy legalább egyenlő kell legyen, mint a tervezési élettartam:

$$\text{Használati élettartam} \geq \text{Tervezési élettartam}''.$$

Tehát az 50 éves tervezési élettartam végének közeledte annyit jelent, hogy fokozott figyelmet kell fordítani a csövek állapotának ellenőrzésére, és esetleg szükség lehet a kedvezőtlenebb környezeti hatásoknak kitett csőelemek javítására, illetve cseréjére.

Ezek alapján aktuális kérdéssé vált, a Sentab típusú vasbeton csőelemek állapotvizsgálatának, leromlási folyamatának elemzése. Az elmúlt években 8 üzem alatti és 10 üzemén kívüli, kiemelt csőelem állapotvizsgálatában vettem részt.

A csövek földdel való eltakartsága és üzemeltetés közbeni zártsága az átlagnál nagyobb nehézségeket támaszt a szóba jöhető vizsgálatok területén, így ezen az esettanulmányon keresztül be tudom mutatni az állapotvizsgálatok kapcsán felmerülő nehézségeket is.

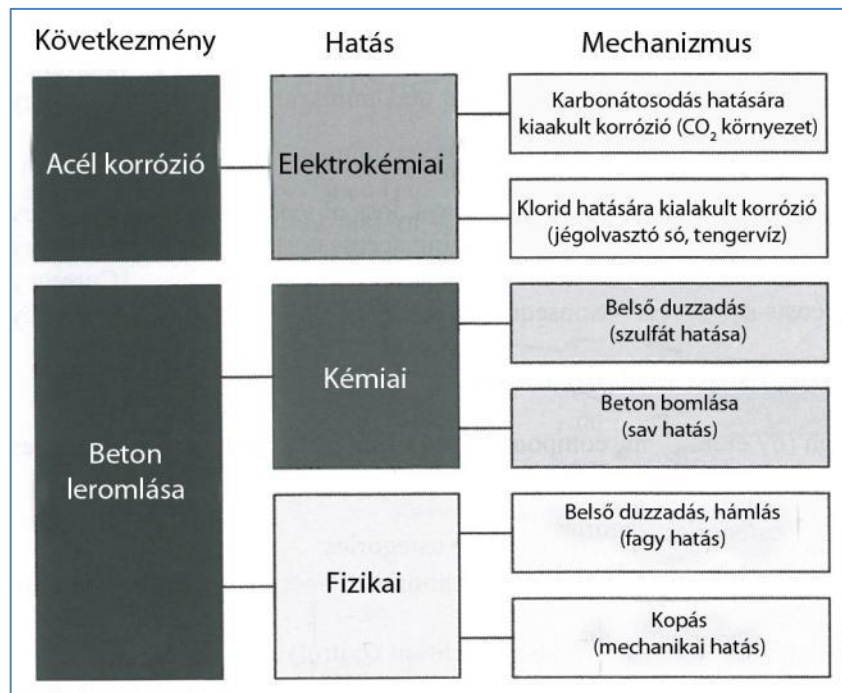
Diplomamunkámban saját vizsgálataim alapján ismertetem a Sentab típusú feszített vasbeton csöveknél tapasztalt leromlási folyamatokat és azok elemzési módját.

Azokhoz a leromlási folyamatokhoz, melyeket a Sentab csövek esetén nem tapasztaltunk, más gyakorlati példákat ismertetek a diplomamunkámban.

2. LEHETSÉGES LEROMLÁSI FOLYAMATOK ÁTTEKINTÉSE

A vasbeton szerkezetek állapota a különféle környezeti hatások miatt kezd el romlani. Többféle leromlási folyamatot is megkülönböztethetünk (2.1. ábra).

A beton leromlását kémiai és fizikai folyamatok is okozhatják. A beton belső duzzadásának, illetve a beton bomlásának következtében kémiai hatás miatt kezdődik meg a beton leromlása. Fagy, illetve koptatás következtében fizikai hatás miatt romlik a beton állapota.



2.1. ábra: Leromlási mechanizmusok és azok hatása vasbeton szerkezetek esetén
[fib bulletin 59]

Vasbeton szerkezeteknél nem csak a beton leromlása okozhat problémát, hanem a betonban található acélbetétek, feszítőhuzalok korróziója is. Az acélbetétek, illetve feszítőhuzalok korróziója alatt a fémes állapotból a nem fémes vegyületekké való átalakulást értjük, mely kémiai, vagy elektrokémiai folyamatokon keresztül megy végbe. *(Kémiai korrózió során a fémion és az elektrolit kilépése 0,4 nm-nél kisebb távolságban következik be, míg az elektrokémiai korrózió során a két részfolyamat térben elkülönülve, elektrolit (pl.: víz) jelenlétében valósul meg [Csányi, 2006].)* Vasbeton szerkezeteknél, néhány speciális példától eltekintve, elektrokémiai korrózió alakul ki. Az elektrokémiai korrózió esetén szükség van arra, hogy az anód és a katód között kapcsolat legyen mind elektrolit oldaton keresztül, mind a vasaláson keresztül.

2.1. Szulfátos víz és kénhidrogén okozta duzzadáshoz vezető betonkorrózió

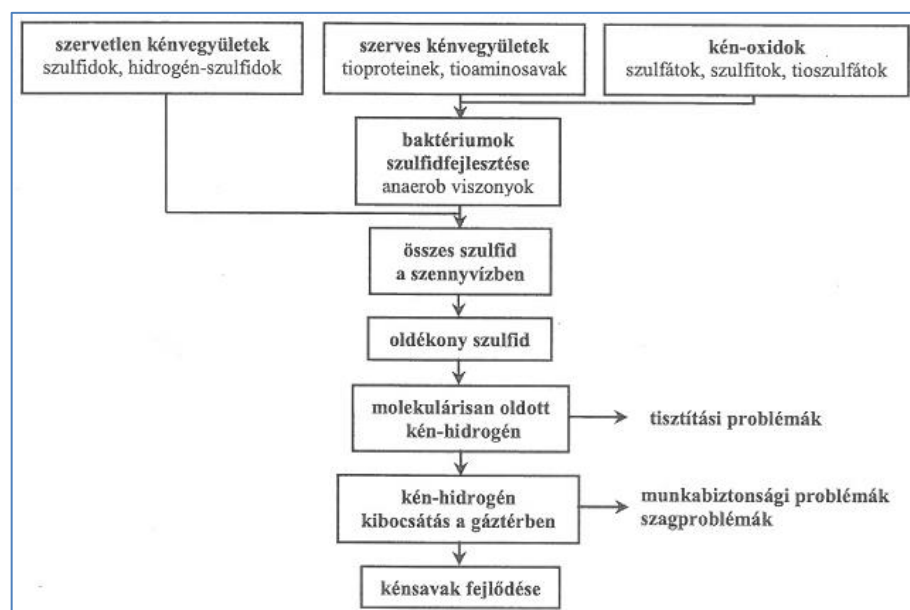
A kénsav sóit és észtereit nevezzük szulfátoknak, melyek úgy képződnek, hogy a H₂SO₄ molekula egy, vagy mindkét hidrogén ionját fémionnal vagy szerves csoportokkal helyettesítjük [Csányi et al., 2013].

Keletkezésük alapján megkülönböztethetünk ásványi eredetű szulfátokat, emberi tevékenységből származó szulfátokat, illetve biológiai eredetű szulfátokat.

A természetben az ásványokból származó szulfátok jelentik a legjelentősebb hatást, mivel a közetek folyamatos utánpótlást biztosítanak. (Pl.: budapesti kiscelli agyagban jelenlevő vasszulfid, illetve pirit (FeS_2) jelentős forrás lehet.) A folyamatos utánpótláson kívül azért is fontosak a természetes forrásból származó szulfátok, mert a szulfátok mellett kénsav is keletkezhet, mely oldja a karbonátos közeteket, szilikátokat, illetve a mészhidrátot, mellyel tágítja a felületi pórusokat, így elősegítve a szulfátion intenzívebb behatolását [Csányi et al., 2013].

Szulfátok keletkezhetnek pangó vizekben, lápokban, elhagyott kutakban, vagy akár szennyvízcsatornáknak is.

A szennyvízzel foglalkozó szakemberek egyik feladata, hogy a szennyvizeket friss, aerob állapotban tartsák, vagyis a lehető leggyorsabban megoldják a tisztítási folyamatot. A nem szakszerűen tervezett, vagy üzemeltetett szennyvízkezelő létesítményekben a szennyvíz rothadó, anaerob állapotba kerülhet, így az „ártalmatlan” szennyvízből különféle kénvegyületek keletkeznek, melyekből kénhidrogén képződik. A gáz állapotú kénhidrogénből végül kénsav alakul ki (2.2. ábra), mely biogén kénsavkorrózióhoz vezethet [Zsigovics, Szilágyi, 2008].



2.2. ábra: Kén körforgása szennyvízhálózatokban [Zsigovics, Szilágyi, 2008]

A szulfát szilárd betonba való jutásával, a cementkővel reakcióba lép, így új ásványok (pl.: másodlagos ettringit, illetve taumazit) keletkeznek. A másodlagos ettringit képződés során a térfogata akár 2,5-szeresére növekedhet [Kausay, 2013]. A reakció során ugyanaz az ettringit keletkezik, mint a cement kötésénél, azonban itt már a megszilárdult cementkőben, mely nem képes elviselni a jelentős alakváltozást, így sokszorosan szétrepedhet, jóformán porrá válhat.

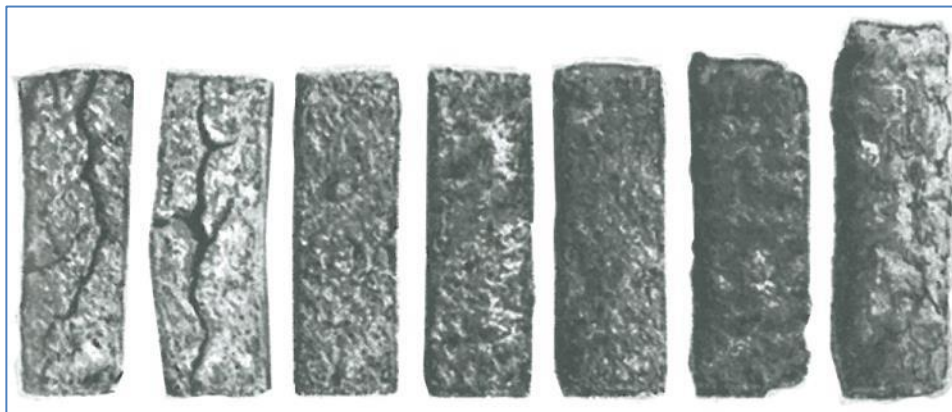
A szulfát-ionok károsító hatását négy paraméter befolyásolja [Balázs-Borosnyói, 2013-II.]:

- a beton áteresztőképessége,
- a víz szulfát-ion koncentrációja,
- a cementkő C_3A tartalma és
- a pórusvíz $Ca(OH)_2$ tartalma.

Thorvaldson és munkatársai 1952-ben közölt publikáció alapján [átvéve: Ujhelyi, 2005] radioaktív nyomjelző elemeket használtak fel a szulfátionok diffúziós együtthatójának cementhabarcsokban, illetve cementpépekben való mérésére. A 25 mm átmérőjű és 50 mm magasságú hengerek palástját szigetelték, majd több héten át radioaktív szulfátoldatban tárolták, és mérték a véglapból kibocsátott sugárzást. A mérést többször megismételték, miközben a véglapot 0,1 mm-es rétegekben fokozatosan lehántották. A mért diffúziós együttható nagyságrendje $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ volt, mely fokozatosan csökkent a szulfátoldatban való tárolás időtartamának növekedésével. Véleményük szerint ez a jelenség a pórusstruktúra megváltozására (eltömődésre) utal. A szulfátionok diffúziójának mérséklésére többek között a következő módszereket javasolták:

- beton utókezelésének javítása,
- hidraulikus kiegészítő anyagok (pernye, granulált salak, kovasavliszt stb.) adagolása,
- pórustömítő adalékszer, vagy kiegészítő anyag adagolása,
- felületi bevonatok felhordása.

A 2.3. ábrán jól látható a beton próbatest tönkremenetele magnéziumsulfát oldatban való tárolás hatására. A próbatestek állapota jelentősen függ az oldat koncentrációjától. Ez magyarázza azt is, hogy a duzzadásos korrózióknak kitett betonokat a körülvevő közegének szulfátion (SO_4^{2-}) tartalma alapján kell környezeti osztályba sorolni.



2.3. ábra: Különböző koncentrációjú $MgSO_4$ oldatban tárolt próbatestek tönkremenetele [Kind W. publikációja alapján átvéve: Csányi et al., 2013]

A 2.1. táblázat tartalmazza az MSZ EN 206-1:2002 szabvány környezeti osztályokba való besorolását természetes talajvizek, illetve talajok agresszivitásának függvényében.

2.1. táblázat: Beton besorolása környezeti osztályba a természetes talajvíz és talaj kémiai agresszivitásának függvényében az MSZ EN 206-1:2002, illetve az ÖNORM B 4710-1:2007 szabvány szerint [Kausay, 2013]

A következő agresszív kémiai hatások 5 °C és 25 °C közötti hőmérsékletű természetes talajokra és talajvizekre vonatkoznak, a nyugalmi állapotban lévőhöz közeli, illetve lassú vízáramlás esetén. Minden egyes kémiai jellemzőre a legveszélyesebb érték határozza meg az osztályt. Ha két vagy több agresszív jellemző ugyanahhoz az osztályhoz vezet, akkor a betont a következő magasabb környezeti osztályba kell sorolni, hacsak az adott esetre vonatkozó egyedi vizsgálat nem bizonyítja ezt szükségtelenné.				
Kémiai jellemző	Vizsgálati módszer	Környezeti osztály		
		XA1	XA2	XA3
Talajvíz				
SO ₄ ²⁻ , mg/liter (Duzzadásos korróziót okoz)	MSZ EN 196-2:2005	≥ 200 és ≤ 600	> 600 és ≤ 3000	> 3000 és ≤ 6000
pH (Oldódásos korróziót okoz)	ISO 4316:1977	≤ 6,5 és ≥ 5,5	< 5,5 és ≥ 4,5	< 4,5 és ≥ 4,0
Agresszív CO ₂ , mg/liter (Oldódásos korróziót okoz) ^{a)}	MSZ EN 13577:2007	≥ 15 és ≤ 40	> 40 és ≤ 100	> 100 telítésig
NH ₄ ⁺ , mg/liter (Oldódásos korróziót okoz) ^{b)}	MSZ ISO 7150-1:1992 vagy ISO 7150-2:1986	≥ 15 és ≤ 30	> 30 és ≤ 60	> 60 és ≤ 100
Mg ²⁺ , mg/liter (Oldódásos korróziót okoz)	MSZ EN ISO 7980:2000	≥ 300 és ≤ 1000	> 1000 és ≤ 3000	> 3000 telítésig
nk ^o = °dH német vízkeménység (Oldódásos korróziót okoz) ^{c)}	MSZ EN 13577:2007	0 – 3 azaz nagyon lágy víz	–	–
Talaj				
SO ₄ ²⁻ összes, mg/kg ^{d)} (Duzzadásos korróziót okoz)	MSZ EN 196-2:2005 ^{e)}	≥ 2000 és ≤ 3000 ^{f)}	> 3000 ^{f)} és ≤ 12000	> 12000 és ≤ 24000
Savasság, mliter/kg (Oldódásos korróziót okoz)	DIN 4030-2:2008	> 200 Baumann-Gully	A gyakorlatban nem fordul elő	
^{a)} A szennyvizekből, illetve a szennyvíztisztítás során felszabaduló agresszív CO ₂ -tartalom határértéke az XA2 környezeti osztályban legfeljebb 60 mg/liter, és az XA3 környezeti osztályban legfeljebb 100 mg/liter lehet (ÖNORM B 4710-1:2007). ^{b)} A DIN 1045-2:2008 szabvány szerint trágyalé esetén a betont az ammóniumion-tartalomtól (NH ₄ ⁺) függetlenül az XA1 környezeti osztályba szabad sorolni. ^{c)} A vízkeménység előírása az ÖNORM B 4710-1:2007 szabvány 2 táblázatában található. ^{d)} A 10 ⁻⁵ m/s áteresztőképesség alatti agyagtalajok esetén a betont alacsonyabb környezeti osztályba szabad sorolni. ^{e)} A vizsgálati módszer az SO ₄ ²⁻ sósavval való kivonását írja elő, alternatívaként vízzel való kivonás is használható, ha a beton alkalmazásának a helyén van erre tapasztalat. ^{f)} A 3000 mg/kg határértéket 2000 mg/kg értékre kell mérsékelni, ha fennáll a szulfácionok felhalmozódásának a kockázata a betonban a száradás és a nedvesedés ciklikus változása vagy a kapillárisfelszívás következtében.				

Minél több a cementekben a trikálcium-aluminát-hidrát fázis, annál inkább hajlamos a szulfátduzzadásra. „Az aluminát-modulus (a cementklinker alumínium-oxid

és vas-oxid összetevőinek hányadosa, $AM = Al_2O_3/Fe_2O_3$) csökkenésével a cement szulfátállósága nő, a szulfátálló cementek aluminát-modulusa legfeljebb 0,7, a mérsékelt szulfátálló cementeké legfeljebb 1,0 (MSZ 4737-1:2002) [Kausay, 2013].

Kutatások alapján a kohósalakcementek a beton szövetszerkezetét tömörebbé teszik, mellyel csökken a szulfátok, illetve más káros anyagok betonba diffundálásának mértéke. Továbbá a kohósalak C_3A tartalma kicsi, illetve a kohósalak hidratációja során reakcióba lép a $Ca(OH)_2$ -dal, így a pórusvíz $Ca(OH)_2$ tartalma alacsony lesz. Ennek a három mechanizmusnak köszönhetően használják a kohósalak tartalmú cementeket agresszív talajviszonyok között [Balázs-Borosnyói, 2013-II.]. Ugyanakkor meg kell jegyezni azt is, hogy vizsgálatok alapján $+10^\circ C$ alatt a szulfátion tartalmú közegben tartott kohósalak-tartalmú cementtel készített betonhasábok duzzadása ugyanolyan nagy volt, mint a nagyobb C_3A tartalmú portlandcementtel készített betonhasáboké. Noha ennek oka még nem teljesen tisztázott, az eredményekből arra következtettek, hogy hosszabb ideig hűvös helyen tartott betonok esetén nem elegendő kohósalak-tartalmú cementek alkalmazásával védeni a szerkezetet a szulfát okozta betonkorrózióval szemben [Kausay, 2013].

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány meghatároz a betontulajdonságokra vonatkozó határértékeket az egyes környezeti osztályok esetén (2.2. táblázat), melynek teljesítésével kell tervezni az új beton, illetve vasbeton szerkezeteket. Ezek alapján XA1 osztály esetén CEM II fajtájú kohósalak tartalmú cement használatát javasolja, míg XA2 esetén „MS” jelű mérsékelt szulfátálló, illetve „S” jelű szulfátálló cement használatát javasolja. XA3 környezeti osztállynál „S” jelű szulfátálló cementet, vagy CEM III fajtájú kohósalakcement alkalmazható [MSZ 4798-1:2004].

2.2. táblázat: Betontulajdonságokra előírt határértékek az XA környezeti osztályokhoz [MSZ 4798-1:2004]

6. Talaj és talajvíz kémiai korróziójának ellenálló beton- és vasbeton szerkezetek							
Agresszív talajjal vagy talajvízzel érintkező, enyhén korrózióálló beton	XA1	C30/37	300	0,55	2360	2290	Bármely MSZ EN 197-1: 2000 szerinti CEM II fajtájú kohósalak-portlandcement
Agresszív talajjal vagy talajvízzel érintkező, mérsékelt korrózió- és szulfátálló beton	XA2	C30/37	320	0,50	2380	2320	Az MSZ 4737-1: 2002 szerinti MS jelű mérsékelt szulfátálló vagy S jelű szulfátálló portlandcement
Agresszív talajjal vagy talajvízzel érintkező, erősen korrózió- és szulfátálló beton	XA3	C35/45	360	0,45	2380	2330	Az MSZ 4737-1: 2002 szerinti S jelű, szulfátálló portlandcement vagy CEM III fajtájú kohósalak-cement

A 2.1. táblázat megjegyzései között a d) pontban a következő olvasható: „ 10^{-5} m/s áteresztőképesség alatti agyagtalajok esetén a betont alacsonyabb környezeti osztályba

szabad sorolni”. Ez azzal magyarázható, hogy a talaj kis vízáteresztő képessége esetén a gyenge savakat a lúgos cementkő semlegesíti, illetve utánpótlás híján kevés szulfácion lép reakcióba a cementkővel.

Ezek alapján kijelenthető, hogy a duzzadásos betonkorrozó okozta állapotromlás felméréséhez ismernünk kell az alkalmazott betonösszetételt, a környező talaj, talajvíz tulajdonságait, illetve az agresszív anyag töménységét, hatásának folyamatosságát.

A duzzadásos betonkorrozó veszélyét a víz szulfácion (SO_4^{2-}) tartalmának mérésével kell meghatározni. A szulfácion tartalom meghatározására több eljárás is létezik. Hazánkban az MSZ 14043-10:1982 szabvány van érvényben, mely két eljárást ismertet [MSZ 14043-10:1982]. A tömeg szerinti módszernél sósavas közegben bárium-klorid-oldattal oldhatatlan bárium-szulfát csapadékként leválasztják a vízben levő szulfáciont, és a csapadék tömegéből számítják a szulfácion-tartalmat. Míg a térfogat szerinti módszernél gyengén savanyú, metilalkoholos közegben alizarin-szulfonsavas-nátrium indikátor mellett a szulfácion-tartalmat bárium-klorid-mérőoldattal közvetlenül meghatározzák. (A térfogat módszer 100 mg/l SO_4^{2-} koncentráció alatt csak tájékoztató eredményt ad.) Emellett a szakirodalmakban (pl.: Kausay [2013]) más módszerek is olvashatók.

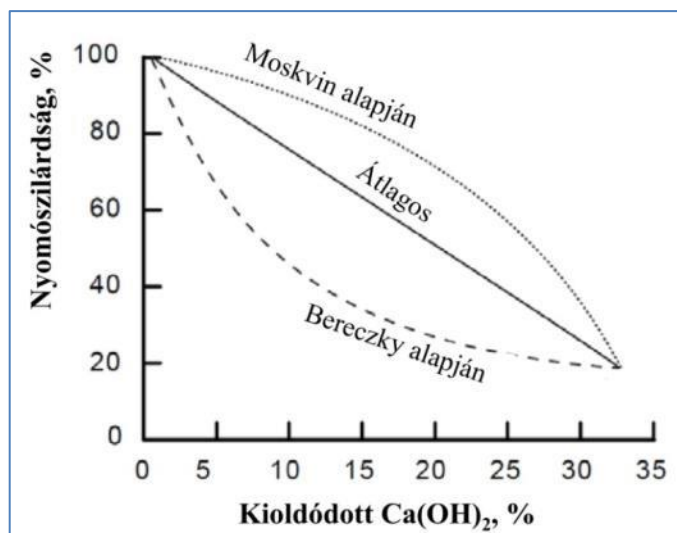
A talajvíz mintavételezésekor figyelemmel kell lenni arra, hogy esős időszakban, hóolvadáskor sokkal kisebb lehet a talajvíz szulfácion koncentrációja, mint száraz időszakban.

2.2. Oldódásos betonkorrozó

Oldódásos betonkorrozóról beszélünk, amikor a szilárd beton savak, vagy savas vizek (pl.: szénsavas gyógyvizek) érik. **Savkorrozó** hatására a cementkő, illetve a finomszemű karbonátos adalékanyagok kioldódhatnak. A cementkő meszes fázisait a savak vízzoldható vegyületekké alakítják át, így vizes és atmoszférikus hatásokra lebomlanak, oldódnak [Kausay, 2013].

Lágyvizek, illetve sóoldatok hatására kilúgozási, illetve cserebomlási korrozó alakulhat ki.

Esővíz és lágyvíz hatására lassan kioldódhatnak a cementkő vízzoldható összetevői. A lágyvíz **kilúgozó** hatása miatt a betonban levő, vízben egyébként rosszul oldódó, szabad $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fokozatosan kioldódik, így végül a cementkő többi alkotórészének felbomlásához vezethet, melynek hatására a beton elveszíti szilárdságát (2.4. ábra) és szétesik. A kutatók vizsgálati eredménye eltérő azzal kapcsolatban, hogy a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kioldódása milyen mértékű szilárdságcsökkenést okoz, azonban az egyértelműen látható, hogy a beton szilárdsága akár 20%-ára is lecsökkenhet a kalcium-hidroxid 30-35%-os kioldódásának hatására.

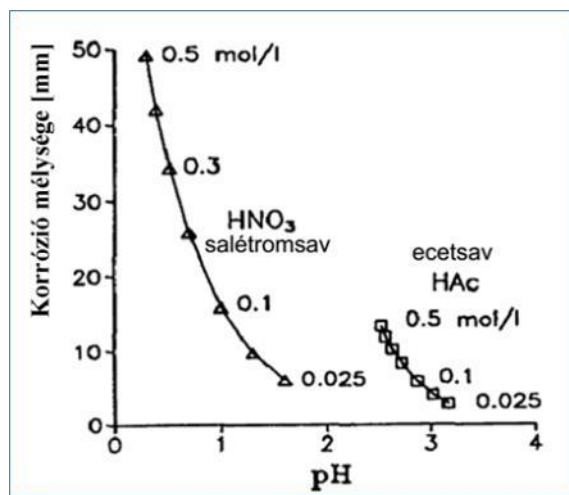


2.4. ábra: Beton szilárdságcsökkenése a kioldódott Ca(OH)_2 függvényében [Balázs-Borosnyói, 2013-I.]

A gyakorlatban a következő kationok okozhatnak kilúgozódást: nátrium, kálium, kalcium (500 mg/liter oldatkonzentrációig). A teljesen tiszta, sómentes desztillált víz, ipari kondenzált víz, hólé, esővíz patakok, tavak folyók lágyvize oldja a cementkő kalcium-hidroxid fázisát [Balázs, 1994].

Cserebomlási korrózió során az agresszív vegyületek kationjai a cementkő vegyületeit átalakítják. Leggyakrabban az ammónium-, illetve magnéziumion okoz cserebomlási korróziót. A talajvizeikben magnéziumion elsősorban magnézium-szulfátból, magnézium-kloridból, illetve magnézium-karbonátból képződik. A magnézium sók cserebomlási reakcióba lépnek a kalcium sókkal, így pl.: a következő reakcióegyenlet játszódhat le: $\text{MgCl}_2 + \text{Ca(OH)}_2 = \text{CaCl}_2 + \text{Mg(OH)}_2$. Ennek hatására a cementkő összes kalcium tartalma fokozatosan kicserélődhet magnéziumra, így a cementkő széteshet. Az ammónium sók elsősorban trágyalevekből, szennyvizekből kerülhetnek a beton környezetébe. Az ammónium a betonra sokkal veszélyesebb, mint a magnézium [Balázs, 1994].

Az oldódásos betonkorrózió mértékét jelentősen befolyásolja a betont érő sav fajtája, illetve koncentrációja. Ezt igazolják Pavlik (1994) kutatási eredményei is (2.5. ábra), melyek alapján megfigyelhető a korróziós mélység alakulása salétromsav, illetve ecetsav hatására.



2.5. ábra: Beton korróziós mélységének alakulása salétromsav, illetve ecetsav hatására [Pavlik, 1994]

A szennyvízkezelő műtárgyaknál keletkező kénsav (körforgását a szennyvízben lásd 2.2. ábrán) a betonkorrózió tekintetében különleges helyet foglal el a szerves savak között, ezért nem sorolható be egyszerűen a szerves savak közé, hanem a biogén kénsavkorrózióval külön kell foglalkozni. A 2.3. táblázat a savas oldat pH-értéke és a korrózió várható foka közti összefüggést adja meg. (Mivel a kénsav által okozott korrózió során szulfátkeletkezés miatti duzzadás megy végbe, így ennek mérsékléséhez javasolt szulfátálló cementet alkalmazni.)

2.3. táblázat: Összefüggés a pH-érték, a korrózió foka és a szükséges ellenintézkedések között, biogén kénsavkorrózió esetén [Zsigovics, Szilágyi, 2008]

pH-érték	A korrózió foka	Korrózió elleni védőintézkedések
13	7,5	tömör beton, külön védőintézkedés nem szükséges
12		
11		
10		
9		
8	gyenge	szulfátálló cement
7		
6	közepes	a beton védelme bevonattal
5		
4		
3	erős	
2		
1		
0		

Az oldódásos betonkorrózióra különösen érzékenyek a karbonátos adalékanyagot (mészkő, dolomit) tartalmazó betonok. Az érzékenység a szemnagyság csökkenésével növekszik. Azonban a gyengén savas állóvizek esetén a karbonátos adalékanyag még javíthatja is a szerkezet tartósságát, hiszen a gyengén savas vizet semlegesítheti, így annak agresszivitását csökkenti.

A 2.1. táblázat tartalmazza az agresszív környezeti hatások alapján való környezeti osztályokba sorolás feltételét. A 2.2. táblázat az egyes környezeti osztályokhoz tartozó határértékeket tartalmazza az egyes betontulajdonságokhoz.

Érdemes megemlíteni, hogy – ellentétben az MSZ 4798-1:2004 szabvánnyal – egyes szabványok, mint pl.: az ÖNORM B 4710-1:2007 szabvány különbséget tesz az oldódásos (XAL) és a szulfátos duzzadásos (XAT) betonkorrózió környezeti osztályai és azok teljesítéséhez szükséges betontulajdonsági határértékek között. Ez lehetőséget ad arra, hogy az adott környezeti hatásoknak jobban megfelelő beton követelményt írják elő.

Az oldódásos betonkorrózió csökkentésére elsősorban kiegészítő anyagokat (pl.: pernye, szilikapor) használnak, melyekkel tömörebb betonstruktúrát tudnak elérni. Nagyon agresszív környezet esetén tömör betonstruktúra mellett is intenzív betonkorrózióval kell számolni, így ezekben az esetekben megfontolandó a különféle bevonatok alkalmazása is.

Kausay [2013] alapján az oldódásos betonkorrózió veszélyének mértékéről tájékoztatást adhat az agresszívnek vélt víz pH értékének indikátor papírral történő meghatározása (melyből azonban önmagában nem szabad messzemenő következtetéseket levonni). Másik helyszíni vizsgálati lehetőség, hogy mérőhengerbe mészköliszt por fölé öntött víz mészkialdó képességének megvizsgálásával tájékozódunk a vizsgált talajvíz agresszivitásáról. Pontos következtetéseket csak laboratóriumi vizsgálatok alapján szabad levonni a talajvíz agresszivitásáról.

Mivel a beton magas pH értéke alapvetően a kalcium-hidroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) következménye, így annak kilúgozódásakor a pH érték lecsökken. Ezért a betonok oldódásos korróziójának vizsgálatakor a beton pH értéke tájékoztatást adhat a korrózió előrehaladottságáról.

A betonkorrózió mértékéről pontosabb eredményt kaphatunk a betonból vett furatpor minták vegyelemzésével.

Derivatográfias vizsgálat segítségével kimutatható a beton egy-egy alkotóelemének megléte, illetve hiánya. A derivatogram elemzésével meg lehet határozni az alkotóelemek mennyiségét, így az eredményekből látható az egyes vegyületek hiánya, csökkenése is. (A derivatogramon levő három jel, azaz a TG (*termogravimetriás*), DTA (*differenciál termoanalízis*) és DTG (*derivatív termogravimetriás*) jel összevetéséből lehet következtetni arra, hogy egy adott hőmérsékleten milyen folyamatok játszódnak le, tehát milyen alkotóelemek vannak a vizsgált mintában, illetve mekkora azok mennyisége.) Ez segíthet a kilúgozási, illetve cserebomlási korrózió kimutatásában.

Ha ugyanabban a hőmérséklet intervallumban párhuzamos hőreakciók következnek be, a hőreakciót szolgáltató fázisok DTG és DTA csúcsai átlapolódhatnak, többszörös csúcsok vagy inflexiók jelennek meg. Ezekben az esetekben a fázisok

azonosítása derivatográfiás módszerrel nehézkes vagy nem lehetséges. Így a derivatográfiás vizsgálatot érdemes a röntgendiffrakciós fázisanálízissel együtt alkalmazni, hiszen a röntgendiffrakciós fázisanálízis segítségével azonosíthatók a kristályos állapotú fázisok.

Fontos tisztában lenni azzal is, hogy derivatográfiás módszerrel nem elemezhetők a vizsgált minta azon fázisai, melyek a derivatográfiás mérés hőmérséklet intervallumában nem szenvednek el semmiféle hőreakciót [Kopecskó, 2013].

2.3. Alkáli-adalék reakció

„A beton-adalékanyagok alkáli reakciója Magyarországon szerencsére eddig nem ismert jelenség, vagy csak szórványosan tapasztalt. Külföldön azonban nem ritka az ilyen betonkárosodás” [Balázs et al., 2011]. Annak ellenére, hogy hazánkban nem jellemző ez a leromlási folyamat, fontosnak tartom a folyamat rövid ismertetését.

„Kedvezőtlen körülmények között – mint például az adalékanyag hajlama alkáli reakcióra, a cement nagy alkálifém-oxid-tartalma, nedves környezet, nagy hőmérséklet – a beton adalékanyagok reakcióba léphetnek a cementkővel. Az alkáli reakció térfogatnövekedéssel jár, a reakció jellegétől függően a beton felületén reakció-termékek jelenhetnek meg, a beton teljesen összeropedezik, szilárdságát elveszti. Az ilyen betont javítani nem lehet” [Kausay, 2013] (2.6. ábra).



2.6. ábra: Alkáli-adalék reakció megjelenése a betonfelületen [Woods, 1968]

Az alkáli-adalék reakciónak két változata van [Balázs - Tóth, 1997]:

- alkáli-szilikát reakció,
- alkáli-karbonát (alkáli-dolomit) reakció.

Alkáli-szilikát reakció akkor következhet be, ha az adalékanyag oldható kovasavat (nem kristályos, amorf szilikátokat, ún. hidrogéleket) tartalmaz. Ebben az esetben gélyszerű (meg nem szilárduló), alkálifém-metaszilikát képződik, mely a víz felvételére és duzzadásra hajlamos marad, így az adalékanyag és a cementkő közti tapadás megszűnhet. A keletkezett gélyszerű anyag esetleg megjelenik a repedések

mentén, a beton felületén is. A lejátszódó átalakulási folyamat a következő [Balázs et al., 2011]:



ahol: **M** = Kálium (K) vagy Nátrium (Na) lehet.

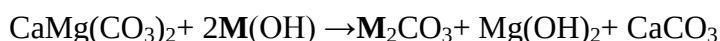
A beton előállításánál felhasznált homokos kavics adalékanyagokban – a származási helytől függően – előfordulhatnak olyan komponensek, amelyek hajlamosak az alkáli szilikát reakcióra. Az adalékanyag veszélyesen reakcióképes kovasavas összetevői a 2.4. táblázatban találhatók.

2.4. táblázat: adalékanyag veszélyesen reakcióképes kovasavas összetevői [MÉASZ ME-04.19:1995]

Reaktív anyag	Kémiai összetétel	Fizikai jelleg
Opál	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amorf
Kalcedon	SiO_2	Mikrokristályos-kriptokristályos, rendszerint szálak
Bizonyos kvarc-formációk	SiO_2	(a) mikrokristályos-kriptokristályos (b) kristályos, de igen töredezett, deformálódott és/vagy beágyazódásos
Krisztobalit	SiO_2	kristályos
Tridimit	SiO_2	kristályos
Riolites, dácitos, latitos vagy andezites üveg vagy kriptokristályos, defitifikált termékek	Kovasavas, kisebb mennyiségű Al_2O_3 , Fe_2O_3 tartalommal, alkálikus talajok vagy alkáliák	Üveges vagy kriptokristályos anyag, mint a vulkáni kőzetek kötőanyaga vagy a tufák törmelékei
Szintetikus kovasavas üvegek	Kova-savas anyagok, kevesebb alkáliával, alumínáttal és/vagy más alkotókkal	üveg

Az **alkáli-karbonát (alkáli-dolomit) reakció** Puskásné Högyes [1978] és Kazimir és Julius [1978] vizsgálatai szerint az alkáli-karbonát reakció egyes meszes vagy agyagos-kovás-meszes dolomitok esetén fordulhat elő. Alkáli-karbonát reakcióra hajlamos kőzetek többek között az USA-ban, Kanadában, Irakban, Németországban, Lengyelországban találhatók.

A duzzadásos alkáli-dolomit reakció során a dolomit adalékanyag kalcium-magnézium-karbonátja és a cementkő alkálifém-hidroxidja egymásra hatásából alkálifém-karbonát, magnézium-hidroxid (brucit) és kalcium-karbonát keletkezik [Balázs et al., 2011]:



ahol: **M** = Kálium (K) vagy Nátrium (Na) lehet.

Az alkáli-adalék reakciónak két feltétele van [Balázs - Tóth, 1997]:

- 1) a cement alkáli tartalma Na_2O egyenértékben kifejezve ($\text{Na}_2\text{O} + 0,66 \text{ K}_2\text{O}$) nagyobb legyen a cementet jellemző értéknél. A MÉASZ ME-04.19:1995 11. fejezete szerint az egyes cementfajták alkáli tartalma a következő:
 - portlandcement, pernyeportlandcement és 10-30% kohósalak tartalmú portlandcement esetén: 0,6%,
 - 5-10% trasz tartalmú portlandcement esetén: 0,8%,
 - 15-20% trasz tartalmú portlandcement esetén: 1,5%,
 - 35-65% kohósalak tartalmú portlandcement esetén: 1,2%,
 - 66-80% kohósalak tartalmú portlandcement esetén: 2,0%,
- 2) legyen olyan adalékanyag alkotó, mely a cement alkáli tartalmával reakcióba lépve duzzadást okoz.

Az alkáli reakció kialakulásához több évre, évtizedre van szükség, és vizsgálatok alapján csak nedves környezetben következhet be, így a magasépítési, időjárástól védett betonok alkáli reakciója valószínűtlen. A víznek, fagynak, esetleg sózásnak kitett szerkezeteknél azonban nem lehet kizárni az alkáli-adalék reakció hatására bekövetkező, duzzadásos korrózió veszélyét, ha kialakulásának egyidejűleg az adalékanyag és a hidratált cement összetétele is kedvez. Az alkáli reakció meleg hatására felgyorsul [Balázs et al., 2011].

2.4. Fagy hatására bekövetkező betonkorrózió

Ha a beton, vasbeton, illetve feszített vasbeton ki van téve fagy hatásának, miközben a kapilláris rendszerében víz van, az ismétlődő fagyás és felengedés (felolvadás) hatására a betonstruktúra károsodhat. A betonok fagyállósága nagyon sok paramétertől függ.

Ujhelyi [2005] szerint a betonok fagyással szembeni ellenállását a következő négy fizikai folyamat határozza meg:

- pórusok vízzel való telítési folyamata, illetve telítettségének mértéke,
- fagyás folyamata, melynek bekövetkezéséhez szükséges hőmérséklet a pórusméretek függvénye (2.5. táblázat),
- víz térfogat növekedése és az ezáltal okozott feszítő hatás, valamint
- az ún. hősokk.

A fagyás során a leromlás oka szerteágazó lehet. Elsősorban a következő mechanizmusokkal lehet magyarázni a tönkremenetelt:

- fagyás során már az első jégkristály csírák vizet szívnak a környező kisebb pórusokból, és ezeken a részeken mikro-jéglencsék keletkeznek,
- a víz térfogata általános esetben, fagyás közben 9%-kal nő. A kapillárisrendszer, illetve a betonban levő hajszálrepedések vízzel telítődhetnek, majd fagy hatására a betonba jutott víz térfogata megnő,
- minden felmelegedés során a pórusrendszer tágul, visszaáll az eredetihez közeli nyomásállapot. Ennek eredményeképpen a pórusokban a nyomás

csökken, melynek hatására vizet vesznek fel azokból a kapillárisokból, amelyekben még van meg nem fagyott víz. Ez a folyamat addig ismétlődik, míg a kritikus víztelítettséget (károsodást okozó víztartalom határértékét) el nem éri [Balázs et al., 2011],

- a beton duzzadása 50 fagyasztási ciklus hatására a 0,4 mm/m értéket megközelítheti. A megfagyott beton rugalmassági modulusa felengedett állapotban kisebb lesz, mint az eredeti [Balázs et al., 2011],
- ha a víz fagyása közbeni térfogatváltozást a környező beton gátolja, akkor a kialakuló kristályosodási nyomás a betont húzásra veszi igénybe, melynek hatására repedések keletkezhetnek,
- az így keletkezett repedésekbe a következő felolvadáskor a víz befolyhat, majd az ismételt fagy alkalmával a beton struktúráját tovább károsítja.

2.5. táblázat: A pórusvíz fagyáspontja a pórusméret függvényében (Balázs, 1997 és Zement Taschenbuch, 2002 alapján szerkesztve) [Balázs–Kausay, 2008]

Pórus	Pórusméret mértékegységek szerint					Pórusvíz fagyáspontja* kb. °C	
	m	mm	μm	nm	Å		
	méter	milliméter	mikrométer	nanométer	ångström		
	1 m	10 ⁻³ m	10 ⁻⁶ m	10 ⁻⁹ m	10 ⁻¹⁰ m		
Durva pórus	$> 10^{-3}$	> 1	$> 10^3$	$> 10^6$	$> 10^7$		
Légpórus	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10^{-1} - 1$	$10^2 - 10^3$	$10^5 - 10^6$	$10^6 - 10^7$	0 – (-3)	
Kapilláris pórus	makro	$3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$	$3 \cdot 10 - 10^2$	$3 \cdot 10^4 - 10^5$	$3 \cdot 10^5 - 10^6$	0 – (-3)
	mezo	$10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 - 3 \cdot 10$	$10^3 - 3 \cdot 10^4$	$10^4 - 3 \cdot 10^5$	(-3) – (-15)
	mikro	$10^{-7} - 10^{-6}$	$10^{-4} - 10^{-3}$	$0,1 - 1,0$	$10^2 - 10^3$	$10^3 - 10^4$	(-15) – (-20)
Gélpórus	makro	$3 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-2} - 0,1$	$3 \cdot 10 - 10^2$	$3 \cdot 10^2 - 10^3$	(-20) – (-40)
	mezo	$10^{-9} - 3 \cdot 10^{-8}$	$10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$	$1 - 3 \cdot 10$	$10 - 3 \cdot 10^2$	(-40) – (-90)
	mikro	$< 10^{-9}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-3}$	< 1	< 10	(-90) – (-160)
Összes légbuborék (adalékszerrel képzett) mérete. (Mennyiségének jele: A ₇₅₀ , német nyelvterületen: L750)							
	$< 7,5 \cdot 10^{-4}$	$< 0,75$	$< 7,5 \cdot 10^2$	$< 7,5 \cdot 10^5$	$< 7,5 \cdot 10^6$		
Hatékony légbuborék (adalékszerrel képzett) mérete. (Mennyiségének jele: A ₃₀₀ , német nyelvterületen: L300)							
	$< 3 \cdot 10^{-4}$	$< 0,30$	$< 3 \cdot 10^2$	$< 3 \cdot 10^5$	$< 3 \cdot 10^6$		
* A pórusok hidrotechnikai viselkedése: Durva pórus: Nincs benne számottevő víz Légpórus és makro kapilláris pórus: Percek alatt felszívja a vizet Mezo kapilláris pórus: Hetek alatt felszívja a vizet Mikro kapilláris pórus: Kapilláris vízfelszívással nem telik meg teljesen vízzel Makro és mezo gélpórus: Kondenzációval 50 – 98 % közötti relatív páratartalom esetén megtelik vízzel Mikro gélpórus: Szorpcióval 50 % alatti relatív páratartalom esetén megtelik vízzel Légbuborék: Kritikus víztelítettség mellett sem telik meg vízzel							

Ezek alapján belátható, hogy a beton kapilláris rendszerén keresztül bejutó víz mennyisége nagymértékben meghatározza a fagy hatására bekövetkező károsodás mértékét. A víz betonba való bejutása adszorpcióval, kapilláris vízfelszívással történik. A **fib** Model Code 2010 [fib MC2010] – melyet mintaszabványként, a világ betonra, illetve vasbetonra vonatkozó szabványihoz képest 10-15 évvel előremutatóan állítanak össze – a kapilláris vízfelszívás mértékére a következő képletet határozza meg:

$$w = w_1 (t/t_1)^n = M_w t^n$$

ahol:

- w t idő alatt egységnyi felületen felszívott víz mennyisége [m³/m²]
 w_1 t_1 időpontban adszorbeált víz mennyisége [m³/m²]
 t víz adszorpciójának időtartama [s]

n = egyenletes nedvességtartalom esetén, ha nincs lényeges mikrostrukturális különbség, akkor 0,5; míg nem egyenletes nedvességtartalom esetén $n < 0,5$,
 $M_w = w_1/t_1^n$ víz adszorpció együtthatója [$\text{m/s}^{0.5}$],

ahol: a következő közelítő képlettel lehet becsülni a víz abszorpció együtthatóját egy adott betonszilárdság esetén:

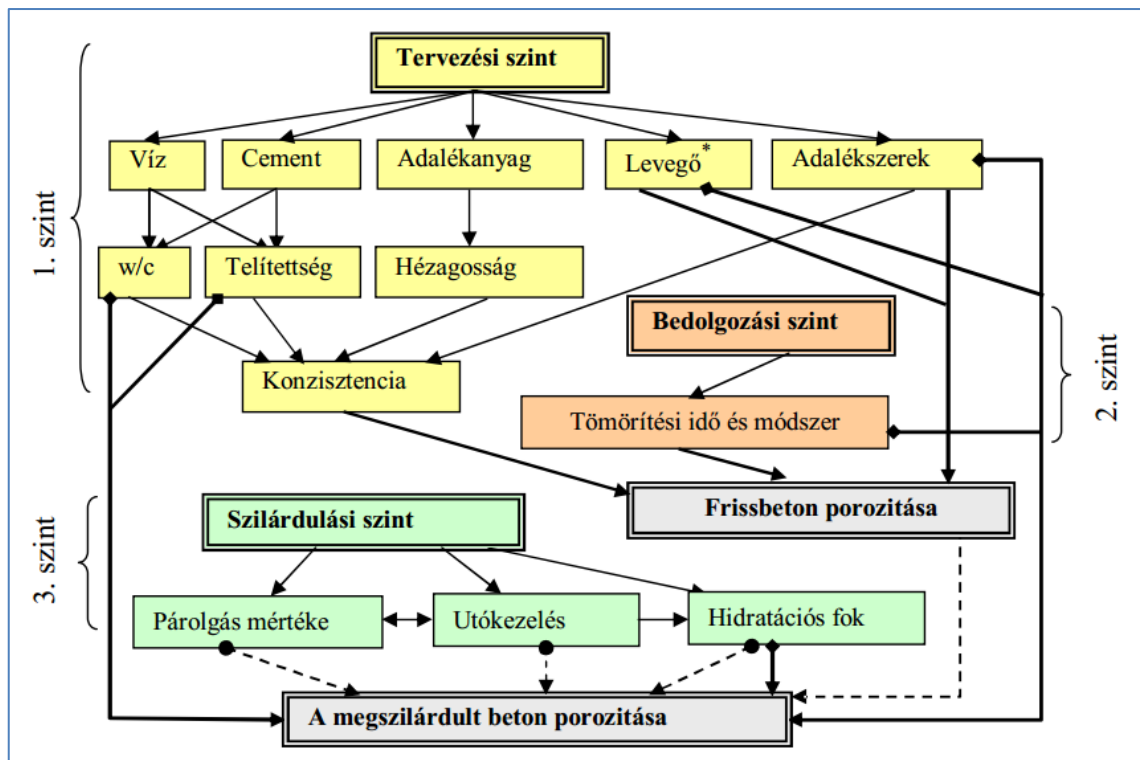
$$M_w = M_{w0} \cdot \frac{1}{f_{cm}^{2.5}}$$

ahol:

$M_{w0} = 0,2 [\text{m/s}^{0.5}]$,

f_{cm} = beton átlagos nyomószilárdsága [MPa].

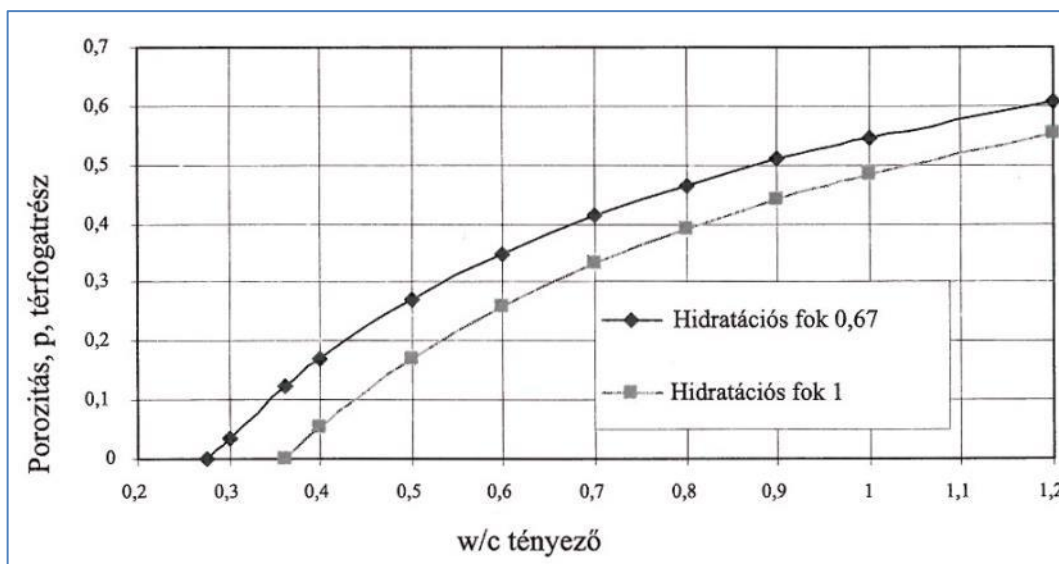
Ezek alapján látható, hogy a kapillárisokon bejutó víz mennyiségét jelentősen befolyásolja az adszorpció együttható, így magának a betonnak a kapilláris rendszere. A beton porozításának kialakulásánál sok tényező játszik szerepet (2.7. ábrán), melyeket 3 szintre (tervezési szint, bedolgozási szint, és szilárdulási szint) lehet csoportosítani.



* kb. 1,5 V% levegőtartalom, ill. vegyszerrel bevitt légbuborékok

2.7. ábra: A porozítás kialakulásának 3 szintje [Nehme, 2004]

„Cementkő kapilláris rendszerének kialakulása legjobban a víz-cement tényezőtől függ” [Nehme, 2008] (2.8. ábra), mely a beton fagyállósága szempontjából döntő jelentőséggel bír. A hidratáció előrehaladtával a pórustartalom csökken. A hidratáció azonban csak addig folytatódik, míg víz jut a cementhez, mely nagymértékben függ a beton utókezelésétől.



2.8. ábra: A cementkő porozitása a víz-cement tényezőtől függően 28 napos korban (hidratációs fok $\alpha=0,67$), 4 év múlva (hidratációs fok $\alpha=1$) [Ujhelyi, 1998]

A síkosság mentesítésre használt vegyületek (elsősorban: nátrium-klorid, nagyon alacsony hőmérséklet esetén: kalcium-klorid, átlagosnál jobban óvott területeken: magnézium-klorid) megváltoztatják a betont érő fagy hatását. Alkalmazásuk hátránya, hogy higroszkóposságuk és oldataik alacsony felületi feszültsége folytán a beton kapillaris rendszerének víztelítettsége és vezetőképessége megnő. Továbbá problémát okoz az is, hogy a beton kapillaris rendszerének egy adott rétegét a jégolvasztó sók oldata tölti ki, így a beton olvasztósóval át nem itatott, mélyebb rétege, illetve a felszíni rétege fagy meg (ahol az olvasztó só koncentrációja csökkent a csapadék hatására). Amennyiben a hőmérséklet tovább csökken, a nagyobb só koncentrációjú, közbelső réteg is megfagyhat, mely a felső réteg leválását okozhatja. A beton ilyen jellegű leromlását fagyhámlásnak nevezzük. Balázs - Borosnyói [2013-I.] alapján lehámlás csak akkor tapasztalható, ha sóoldat borítja a betonfelületet.

Emellett a vasbetonba bejutó kloridion az acélbetét, illetve feszítőbetét korrózióját okozhatja, melynek hatására a korróziós termék nagyobb térfogata miatt a betont megrepesztheti. A repedésbe bejutó víz megfagyása növelheti a leromlási folyamat intenzitását.

A téli sózás hatása hasonló a fagyás hatásához, mivel a hó, illetve jég felolvasztásához hőenergiára van szükség, így a kiszórt só a betonfelület hirtelen hőmérsékletcsökkenését eredményezi. A jelenséget hőlökésnek, a betont érő hatást hősokknak nevezzük. A hőlökés miatt a betonban feszültségek keletkeznek, mely a betonfelület lehámlását, fagyhámlást okozhat [Balázs et al., 2011].

A fagyállóság szempontjából az MSZ 4798-1 szabvány [MSZ 4798-1:2004] XF1-XF4 környezeti osztályokat határoz meg. Az egyes környezeti osztályok teljesítéséhez a szabvány megadja az újonnan készítendő beton nyomószilárdsági osztályának legkisebb értékét, a minimális cementtartalmat, a maximális v/c tényezőt és a friss, illetve a kiszáritott beton testsűrűségének maximális értékét (2.6. táblázat).

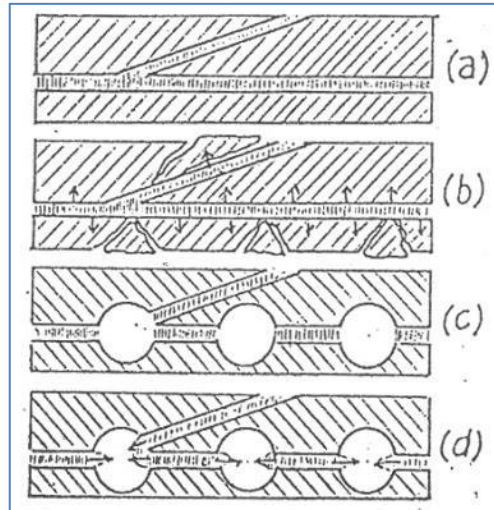
2.6. táblázat: Betonok fagyállóságára vonatkozó környezeti osztályok követelménye az MSZ 4798-1:2004 alapján [Kausay, 2013]

Alkalmazási terület	Környezeti osztály jele	Beton nyomószilárdsági osztálya, legalább ¹⁾	Beton cement-tartalma, legalább, kg/m ³	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegő-tartalma ²⁾ , legfeljebb, térfogat%
Függőleges felületű fagyálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek betonja					
Függőleges felületű, mérsékelt víztelítettségű, esőnek és fagnak kitett, olvasztó sózás nélküli fagyálló beton	XF1	C30/37	300	0,55	1,5
	Légbuborékképző adalékszer nélkül készül a beton. Például: Monolit és előregyártott szerkezetek				
Függőleges felületű, mérsékelt víztelítettségű, fagnak és jégolvasztó sók permetének kitett fagyálló beton	XF2	C25/30	300	0,55	⁶⁾
	Légbuborékképző adalékszerrel készül a beton. A friss beton megkövetelt és megengedett összes levegő-tartalmának értéke az adalékanyag legnagyobb szemmagyságának a függvénye. Lásd a ⁶⁾ megjegyzést Példa: Útépítési szerkezetek				
Függőleges felületű, mérsékelt víztelítettségű, fagnak és jégolvasztó sók permetének kitett fagyálló beton	XF2(H) ⁴⁾	C35/45	320	0,50	1,0
	Légbuborékképző adalékszer nélkül készül a beton. Például: Monolit és előregyártott szerkezetek Alkalmazása út- és repülőtéri burkolatok, híd pályalemezek esetén tilos!				
Vízszintes felületű fagyálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek betonja					
Vízszintes felületű, nagy víztelítettségű, esőnek és fagnak kitett, olvasztó sózás nélküli fagyálló beton	XF3	C30/37	320	0,50	⁶⁾
	Légbuborékképző adalékszerrel készül a beton. A friss beton megkövetelt és megengedett összes levegő-tartalmának értéke az adalékanyag legnagyobb szemmagyságának a függvénye. Lásd a ⁶⁾ megjegyzést Példa: Útépítési szerkezetek, híd pályalemezek				
Vízszintes felületű, nagy víztelítettségű, esőnek és fagnak kitett, olvasztó sózás nélküli fagyálló beton	XF3(H) ⁴⁾	C35/45	320	0,50	1,0
	Légbuborékképző adalékszer nélkül készül a beton. Például: Monolit és előregyártott szerkezetek Alkalmazása út- és repülőtéri burkolatok, híd pályalemezek esetén tilos!				
Vízszintes felületű, nagy víztelítettségű, fagnak és jégolvasztó sóknak közvetlenül kitett, fagyálló beton	XF4	C30/37	340	0,45	⁶⁾
	Légbuborékképző adalékszerrel készül a beton. A friss beton megkövetelt és megengedett összes levegő-tartalmának értéke az adalékanyag legnagyobb szemmagyságának a függvénye. Lásd a ⁶⁾ megjegyzést Például: Útpályabeton, repülőtéri kifutópálya, híd pályalemezek				

A 2.6. táblázat alapján látható, hogy XF1 környezeti osztály esetén lehetőség van légbuborékképző adalékszer nélkül elkészíteni a betont. A légbuborékképző adalékszerek a beton fagy- és olvasztósó-állóságát növelik, így XF2-XF4 környezeti osztály esetén alkalmazásuk az MSZ 4798-1:2004 alapján kötelező. (A szabvány előírja azt is, hogy XF2-XF4 környezeti osztály esetén a képzett levegőtartalomnak legalább 4 V%-nak kell lennie.)

A légbuborékképző adalékszer kedvező hatása abban rejlik, hogy nagyszámú, 0,3 mm-nél kisebb átmérőjű légbuborékot hoz létre a frissbetonban, mely a beton megszilárdulása után is megmarad. Ujhelyi [2005] szerint a légbuborékképző adalékszerrel képzett mesterséges légbuborékok a kapilláris pórusokban helyezkednek el, ezzel megszakítva azok folyamatosságát. A mesterséges légbuborék nélkül készített betonokban megfelelő körülmények között a víz teljesen kitölti a pórusokat, így a

fagyást követően a pórusfalak mentén ébredő feszítő erő a betont megrepeszti (2.9. ábra (a), (b) ábrarész). Míg a gömb alakú légbuborékok kétszer-háromszor nagyobb átmérőjűek, így a gömb alakú légbuborékok még a vízzel telített betonban sincsenek vízzel kitöltve. Ennek következtében a fagyás során a kapillárisokból a jég a légbuborékok irányába tágul, így nem ébreszt a pórusfalakban károsító, repesztő feszültséget (2.9. ábra (c), (d) ábrarész).



2.9. ábra: Mesterséges légbuborékkal és anélkül készített betonban a víz fagyása [Ujhelyi, 2005]

Más kutatások alapján [Springenschmid, 2007] nagyobb jelentősége van a légbuborékképző adalékszer fagyállóságra gyakorolt kedvező hatásában annak, hogy az első jégkristály csírák vízelszívását a légbuborékok megtörik.

Ezen kedvező hatásuk mellett azonban tisztában kell lenni azzal is, hogy a betonban képzett légbuborékok általában csökkentik a beton szilárdságát. (Kivéve, ha a légbuborékképző adalékszer képlékenyítő hatását a v/c tényező csökkentésénél kihasználják.)

A szilárd betonban a légbuborékok előfordulásának sűrűségét az ún. távolsági tényezővel jellemezhetjük. A távolsági tényező „a cementkő bármely pontjának legnagyobb távolsága egy légbuborék felszínétől a cementkővön keresztül mérve” [Nehme, 2004]. A távolsági tényezőtől következtetni lehet a megszilárdult beton légbuboréktartalmára, illetve abból a beton fagyállóságára.

Összefoglalva a beton fagyállósága nagyon sok paramétertől függ. Többek között függ a környezeti körülményektől (pl. a kritikus víztelítettség esélyétől), a beton összetevőinek tulajdonságától, a beton víz-cement tényezőjétől, beton struktúrájától, illetve a légbuborékképző adalékszerrel bevitt légbuborékok méretétől és eloszlásától is. A fagyálló beton készítésének feltétele a környezeti osztályok követelményének betartásán kívül a fagyálló adalékanyag, a megfelelő cement és légbuborékképző adalékszer alkalmazása, a hosszas utókezelés, a betonozás és a tél bekövetkezte közötti hosszú idő [Balázs et al., 2011].

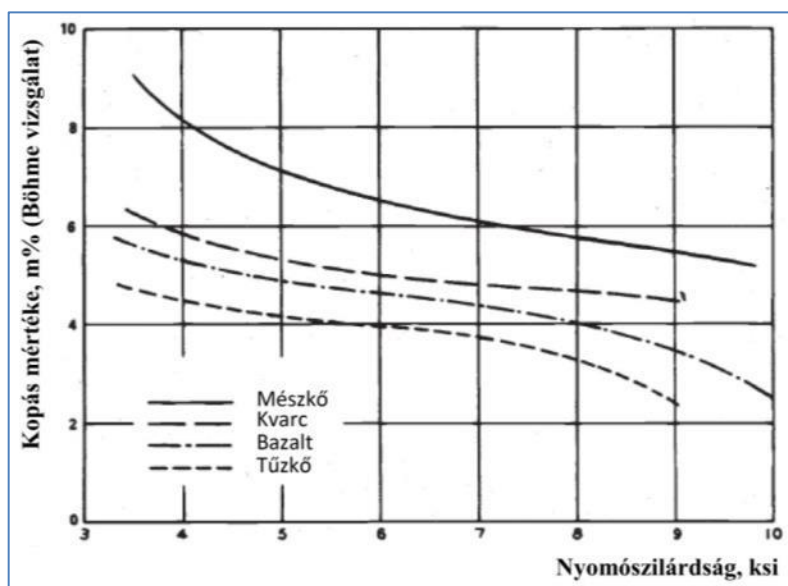
Amennyiben a szilárd beton fagyállóságát meg kell határozni, az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. fejezete külön vizsgálati módot ad meg XF1 és XF3 környezeti osztályokra, illetve XF2 és XF4 környezeti osztályokra. XF1 környezeti osztály esetén legalább 50 fagyasztási-olvasztási ciklust, míg XF3 esetén legalább 100 ciklus elvégzését írja elő. XF2, illetve XF4 környezeti osztály teljesítéséhez 56 ciklus elvégzését írja elő a szabvány. XF2, illetve XF4 környezeti osztály esetén egy ciklus 24 órán át tart, így jól látható ezek a vizsgálatok elvégzése viszonylag hosszadalmas, azonban jól vizsgálható a fagyasztási ciklusok hatására bekövetkező tömegveszteség. (Meg kell azonban említeni, hogy a vizsgálat során elvégzendő 50, 56, illetve 100 ciklus egy valós szerkezet esetén akár egy-két tél alatt is bekövetkezhet, míg általános esetben legalább 50 évre tervezzük a beton, illetve vasbeton szerkezeteinket. Azonban nem annyira extrém hatások között, azaz nem $-20^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 20^{\circ}\text{C}$ között változik a hőmérséklet.)

2.5. Koptatás hatására bekövetkező betonkorrózió

A betont sokféle koptató hatás (pl.: gyalogos forgalom, puha abroncsú közlekedési eszközök, szemcsés anyagok súrlódó hatása, nehéz terhek gördítése, vasabroncsú közlekedési eszközök, nehéz tárgyak csiszoló hatása, stb.) érheti.

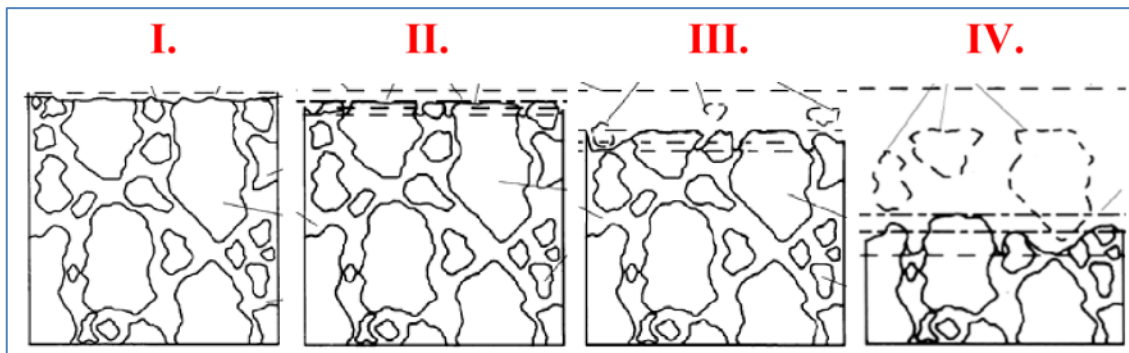
A koptató hatás következtében a felületen károsodás következik be. Mivel a beton, illetve vasbeton különböző keménységű, kopásállóságú részekből (cementkő, adalékanyag, acélbetét, acél-, illetve műanyagszál, stb.) áll, így a felület kopása sem egyenletes.

Ahogy a 2.10. ábrán is látható, az egyes kőzetek kopásállósága jelentősen eltér egymástól, mely az eltérő ásványi összetétellel magyarázható. Egy adott kőzetfajta kopásállósága nagymértékben függ a vizsgált kőzet jellemzőitől (pl.: szövetszerkezetétől), mely hatással van a kőzet nyomószilárdságára is.



2.10. ábra: Kőzetek kopásállósága a nyomószilárdság függvényében (a nyomószilárdság mértékegysége ksi, azaz kilopound per square inch-ben van megadva, $1\text{ksi} = 6,894757\text{ N/mm}^2$) [Lamond - Pielert, 2006]

Ha a betonban adalékanyagként felhasznált kőzet (általában pl.: bazalt, kvarc) kopásállósága nagyobb, mint a kialakult cementkő, akkor a cementkő intenzívebben kezd el kopni, mint a kőzet (2.11. ábra). Ennek megfelelően az adalékanyagok egy idő után kilógnak a felületből, majd amikor az adalékszem és a cementkő közti tapadás túlzottan lecsökken, akkor az adalékszem elválí a felülettől. (Ez a jelenség előfordulhat akkor is, ha a cementkő szilárdságát nagyobbra tervezték az adalékanyagénál, de nem várják meg a szükséges szilárdulási időt a koptató hatású hasznosítás megkezdése előtt.)



2.11. ábra: Koptatóhatásnak kitett beton [Balázs-Borosnyói, 2013-I.]

Előfordulhat, hogy a cementkőnél kisebb koptatási ellenállású adalékanyagot (általában pl.: téglazúzalék, polisztirol gyöngy) alkalmaznak. Ilyenkor a felületre kilógó adalékszemek intenzív kopása következik be, míg a cementkő korróziója kisebb mértékű. Ennek hatására lyukak képződnek a cementkőben. Így a felület érdessége megnő, melyen a koptató hatás intenzívebb lehet.

A betonok kopási ellenállása tehát nagymértékben függ az alkalmazott adalékanyag, illetve a cementkő keménységétől, valamint a cementkő és az adalékanyag közti tapadástól. Emellett azonban nem szabad megfeledkezni a beton bedolgozásának, utókezelésének fontosságáról sem. A kopásállóságot a beton porozítása, szövetszerkezete, esetleges üregek, gyártáshibák nagymértékben befolyásolják.

Az egyes koptató hatások eltérő mértékben károsítják a betont. (Pl.: egy gyalogos forgalom csiszoló, csúszó hatása kevésbé intenzív eróziót okoz, mint egy vasabroncsú közlekedési eszköz által okozott gördülő, súrlódó hatásnak kitett szerkezet.)

A koptató hatásnak kitett betonokat – alkalmazási céljuktól függően – környezeti osztályba kell sorolni. A kopásálló betonok megfelelőségi feltételeivel, illetve az alapján való környezeti osztályba sorolásával az MSZ EN 206-1:2002 [MSZ EN 206-1:2002] szabvány nem foglalkozik, azonban az MSZ 4798-1:2004 szabvány igen.

Kausay [2013] szerint: „az MSZ 4798-1:2004 szabvány hazai gyakorlatban követendő alkalmazási követelményeit pedig módosítani célszerű” a 2.7. táblázat környezeti osztályai szerint.

2.7. táblázat: Betonok kopásállóságára vonatkozó környezeti osztályok módosított követelménye [Kausay, 2013]

Kopásálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek betonja					
Mérsékelt kopásálló, k14/21 jelű kavics- vagy zúzottkőbeton	XK1(H)	C30/37	310	0,50	2,0
	Például: Siló, bunker, tartály könnyű anyagok tárolására, garázspadozat, lépcső, járólapp, kopásálló réteggel ellátandó ipari padlóburkolat kopásálló réteg nélkül				
Mérsékelt kopásálló, k14/21 jelű, légbuborékképzővel készülő kavics- vagy zúzottkőbeton	XK1(H) + XF4	C30/37	320	0,50	6)
	Például: Szabadban lévő, fagyálló lépcső, járólapp				
Kopásálló, k12/18 jelű zúzottkőbeton	XK2(H)	C35/45	330	0,45	2,0
	Például: Nehéz anyagok tárolója, gördülő hordalékkal érintkező beton, egyrétegű járdalap és monolit járda, kétrétegű járdalap kopórétege, közönséges útszegélyelem, lépcső, vasbeton lépcső, aknafedlap				
Kopásálló, k12/18 jelű, légbuborékképzővel készülő zúzottkőbeton, amely eső, fagy, jégolvasztó sók hatásának ki van téve	XK2(H) + XF4	C35/45	340	0,45	6)
	Például: Szabadban lévő, fagyálló egyrétegű járda és monolit járdalap, kétrétegű járdalap kopórétege, közönséges útszegélyelem, lépcső, aknafedlap				
Fokozottan kopásálló, k10/15 jelű zúzottkőbeton	XK3(H)	C40/50	350	0,40	2,0
	Például: Egyrétegű útburkolóelem, kétrétegű útburkolóelem kopórétege, kopásálló útszegélyelem, vasalatlan útpályaburkolat, repülőterei pályaburkolat, konténer átrakó állomás térburkolata				
Fokozottan kopásálló, k10/15 jelű, légbuborékképzővel készülő zúzottkőbeton, amely eső, fagy, jégolvasztó sók hatásának ki van téve	XK3(H) + XF4	C40/50	360	0,40	6)
	Például: Egyrétegű útburkolóelem, kétrétegű útburkolóelem kopórétege, kopásálló útszegélyelem, útpályaburkolat, repülőterei pályaburkolat, konténer átrakó állomás térburkolata				
Igen kopásálló, k8/12 jelű zúzottkőbeton	XK4(H)	C45/55	370	0,35	2,0
	Például: Ipari padlóburkolat, amelyre nem kerül kopóréteg				
Különlegesen kopásálló, k6/9 jelű zúzottkőbeton	XK5(H)	C50/60	390	0,35	1,0
	Például: Vibropréselt térburkolóelem				

A betonok akkor sorolhatók be valamely kopási környezeti osztályba, ha a vonatkozó szabvány szerinti kopási vesztesége kielégíti a 2.8. táblázatban szereplő kopásállósági határértékek valamelyikét.

Magyarországon a betonok kopásállóságát az MSZ 18290-1:1981 szabvány [MSZ 18290-1:1981] szerinti Böhme vizsgálattal kell meghatározni.

A Böhme vizsgálatot az MSZ 18290-1:1981 szabvány alapján legalább 28 napos korában, $71 \pm 1,5$ mm oldalméretű, – a vizsgálati eljárástól függően – légszáraz vagy vízzel telített állapotú próbakockán kell elvégezni.

A vizsgálat során 294,3 N erővel terhelt próbatestet percenként 30 fordulatot végző, öntöttvas korongon, legalább 95 m% alumíniumoxid-tartalmú korund porral kell koptatni. A tárcsa 16 periódusban, periódusonként 22 fordulatot (összesen 352 fordulatot) tesz meg a vizsgálat során. A kopás mértékét a térfogatvesztéssel [mm^3] kell kifejezni. A Böhme vizsgálatot szárazon és vízzel telített próbakockákon, illetve a koptatótárcsára víz csöpögtetése közben is el kell végezni. A szabvány alapján az így

meghatározott eredmények közül a kedvezőtlenebb érték alapján kell a kopási osztályba besorolni a betont.

2.8. táblázat: Követelmény a betonok kopásállóságára [Kausay, 2013]

Környezeti osztály	Kopásállósági osztály jele	Kopásállósági osztály megnevezése	A ΔV kopási térfogatvesztés megengedett mértéke mm ³ -ben	
			Száraz	Vizes
			koptatás esetén	
XK1(H)	k14/21	Mérsékelt kopásálló	14000	21000
XK2(H)	k12/18	Kopásálló	12000	18000
XK3(H)	k10/15	Fokozottan kopásálló	10000	15000
XK4(H)	k8/12	Igen kopásálló	8000	12000
XK5(H)	k6/9	Különlegesen kopásálló	6000	9000

2.6. Biológiai károsító hatások

A beton, illetve vasbeton szerkezeteket biológiai hatások is érhetik, melyek hozzájárulhatnak annak állapotromlásához (2.12. ábra).



2.12. ábra: A beton korróziójához hozzájárultak a biológiai hatások [fib bulletin 53]

A biológiai hatások, melyek a beton károsodásához vezethetnek alapvetően két csoportba sorolhatók [fib bulletin 53]:

- növény megtelepedése, biológiai növekedése a beton felületén, mely fizikai, illetve mechanikai hatásával károsítja a betonszerkezetet,
- bakteriális hatások, melyek szerves, vagy szervetlen sava reakcióba lép a cementkővel, tehát kémiai úton károsítják a szerkezetet.

A szerkezet apró repedéseiben, üregeiben lerakódó porban megtelepülnek a növények, melyek hajtásgyökerei a növény fejlődése során megvastagodnak. A növények gyökerének növekedése nagy feszítő hatást fejt ki a szerkezetre. Ez a feszítő hatás 10 cm átmérőjű gyökér esetén akár 30-50 tonna is lehet [Török, 2012].

A beton magas pH értéke általában megvédi a betont a biológiai növekedés miatti betonkorroziótól. Azonban a karbonátosodás, illetve az oldódásos betonkorrozió jelentősen csökkentheti a beton pH értékét, így lehetősége lesz a „biológiai kolóniáknak” a megtelepedésre [fib bulletin 53]. A megtelepedő növények nem csak a feszítő hatásukkal, hanem a gyökérsavaik által is jelentős szerepet játszanak a betonkorrozióban.

A baktériumok szerves, illetve szervetlen savakat állítanak elő, melyek a cementkő kémiai jellegű károsodását okozzák. Ez a hatás előfordulhat szennyvízcsatornáknak, kukoricasilókban, vagy akár egyéb helyeken is.

Anaerob körülmények között a szennyvízben található baktériumok betonkorroziót okozhatnak. Szennyvízben, oldott oxigén hiányában, anaerob baktérium oxigént állít elő a szulfát ionból (SO_4^{2-}), miközben szulfid (S^{2-}) keletkezik. A szulfid reakcióba lép a vízzel és így hidrogén-szulfid gáz keletkezik. Amint lehetséges, a hidrogén-szulfid oxidálódik az aerob baktériumok közreműködésével. Majd a szennyvízcső nedves falán kénsav jön létre, mellyel már az oldódásos betonkorrozió kapcsán foglalkoztam.

Emellett a biológiai korrozio állati ürülék hatására is bekövetkezhet. Például nagy madárpopuláció hatására vastag madárürülék rakódhat le a beton felületén, melyből a csapadék hatására szerves savak oldódhatnak ki, amelyek a betonba szivároghatnak, annak korrozioját okozhatják.

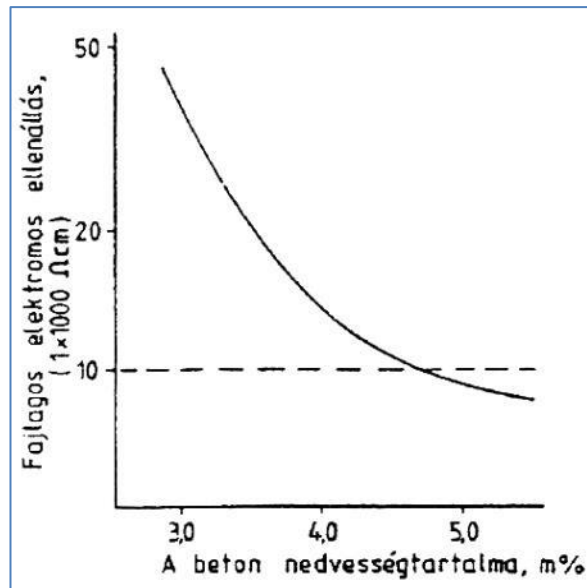
2.7. Karbonátosodás okozta acél korrozio

A karbonátosodás a beton, vagy cementhabarcs esetén a kapillárisok elzáródása és a szilárdság növekedése szempontjából kedvező [Kausay, 2013], azonban vasbeton, illetve feszített vasbeton esetén a beton pH értékének csökkenése a korrozio veszély miatt kedvezőtlen.

Az acélbetétek korroziojához 3 feltétel együttes jelenlétére van szükség:

- a beton pH értéke 9 alá csökkenjen, mely bekövetkezhet a beton karbonátosodása, vagy a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kioldódása által,
- a beton szükséges elektromos vezetőképességének biztosítása, melyet a betonban levő, illetve a kapilláris pórusok által felvett víz (pórusoldat) biztosít. Szakirodalmi adatok alapján korrozioval akkor kell számolni, ha a beton fajlagos ellenállása 5-10 $\text{k}\Omega\text{cm}$ alá csökken [Kocsányiné Kopecskó, 2004] (2.13. ábra), továbbá
- az oxigén acélbetéthez, illetve feszítőhuzalhoz jutása is fontos, mely függ a betonfedés mértékétől, a beton pórusrendszerétől (tömörségétől), és a környező víztartalomtól.

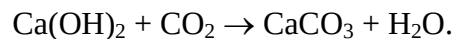
Ha a három feltétel közül mindegyik teljesül, akkor az acél rozsdásodni kezd a betonban.



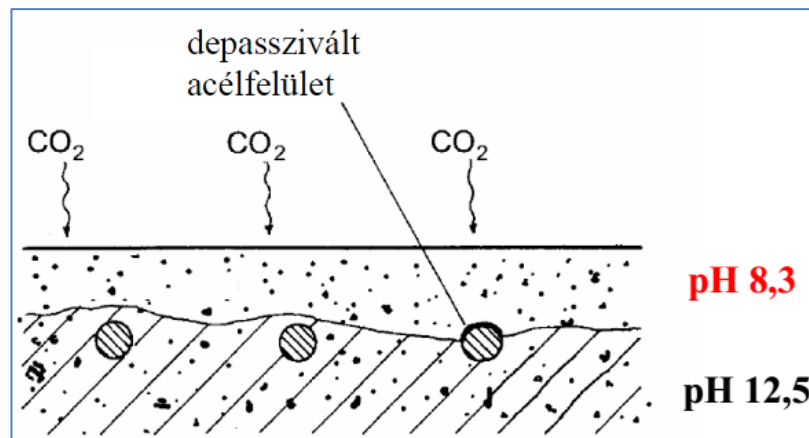
2.13. ábra: Nedvesség hatása az elektromos ellenállásra [Nischer – Hartl, 1983]

A portlandcement hidratációja során kalcium-hidroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) keletkezik, melynek hatására a beton lúgos kémhatásúvá ($\sim 12,4$ pH) válik. Ilyen kémhatású közegben az acél felületén mikroszkopikus vastagságú oxid-réteg, ún. passzív réteg keletkezik. Az acélbetétek mindaddig passzívan viselkednek, amíg az erősen lúgos kémhatású környezet az oxidréteget stabilan tartja.

Beton karbonátosodásáról akkor beszélünk, ha a beton pórusaiba bediffundáló széndioxid (CO_2) reakcióba lép a betonban levő kalcium-hidroxiddal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A beton karbonátosodásának folyamatát leegyszerűsítve a következő egyenlettel írhatjuk le:



A karbonátosodás során a beton pH értéke 9 alá csökkenhet, ezáltal megszűnik az acél körüli passziváló réteg (2.14. ábra).



2.14. ábra: Karbonátosodás és a depasszivált acélfelület [Balázs-Borosnyói, 2013-I.]

A karbonátosodás mélységét úgy szokás értelmezni, mint azt a távolságot a betonszerkezet külső felületétől, melyben 8,3 alá csökkent a beton pH értéke [Balázs-Borosnyói, 2013-I.].

A karbonátosodás sebességét leginkább a következő tényezők befolyásolják [Balázs et al., 2011]:

- a beton áteresztőképessége,
- a rendelkezésre álló $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mennyisége,
- a környezet szén-dioxid koncentrációja,
- a környezeti hatásoknak való kitettség mértéke.

A **fib** Model Code 2010 [fib MC2010] alapján állandó koncentráció esetén a gázok és a folyadékok szállított mennyiségét a Fick I. törvénye alapján lehet meghatározni:

$$Q = D \frac{c_1 - c_2}{l} At$$

ahol:

Q	az anyag szállított mennyisége [g],
$c_1 - c_2$	a koncentráció különbsége [g/m^3],
l	behatolási mélység [m],
A	behatolási felület [m^2],
t	idő [s],
D	diffúziós együttható [m^2/s].

Az anyagáram-sűrűség egyenesen arányos a koncentrációeséssel. D – diffúziós együttható, ami megadja az egységnyi idő alatt egységnyi felületen átdiffundált anyag mennyiségét, ha a koncentrációesés is egységnyi volt.

A széndioxid diffúziójának mértékét nagymértékben befolyásolja a beton nedvességtartalma. A széndioxid betonban mérhető diffúziós együtthatója közepes nedvességtartalom esetén $10^{-7} < D < 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ érték között változhat.

A fib Model Code 2010 [fib MC2010] alapján normál szilárdságú betonok esetén, ha állandóan 20°C -on és 65% relatív páratartalomon tárolják a betont, akkor a széndioxid diffúziós együttható karbonátosodott betonon keresztül a következő képlettel írható le:

$$\log(D_{\text{CO}_2}/D_{\text{CO}_2,0}) = -0.05 f_{cm}$$

ahol:

D_{CO_2}	széndioxid diffúziós együtthatója [m^2/s],
$D_{\text{CO}_2,0}$	$= 10^{-6.1} [\text{m}^2/\text{s}]$
f_{cm}	beton átlagos nyomószilárdsága [MPa].

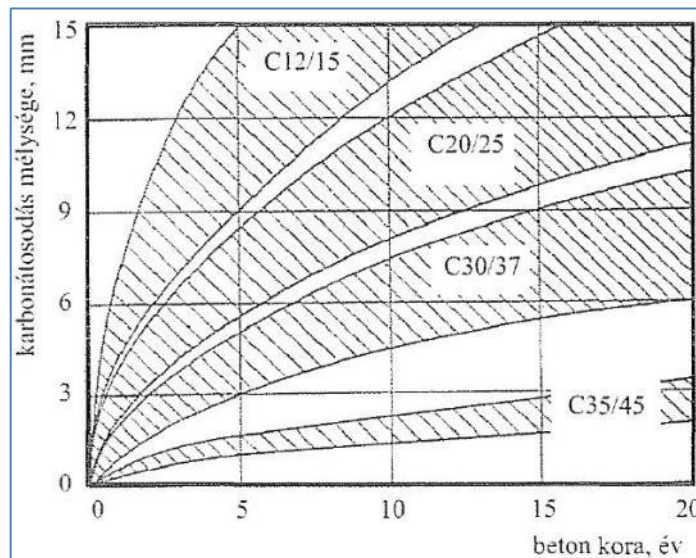
Azonban a szabvány felhívja a figyelmet arra, hogy ha a beton ki van téve a környezeti hatásoknak (különösen a csapadéknak), a diffúziós együttható lényegesen kisebb lehet, mint az előző képlet alapján becsült érték.

Minél kisebb egy beton áteresztő képessége, annál nagyobb ellenállást fejt ki a befelé diffundáló széndioxiddal szemben (egy adott nedvességtartalom esetén). Kis karbonátosodási sebességet lehet megfigyelni olyan betonszerkezeteknél is ahol, noha a beton kis tömörségű, azonban a gyakori vízhatás miatt a kapilláris pórusok víztelítetté válnak. Ez azzal magyarázható, hogy a széndioxid diffúziója vízben 10^6 -szor lassabb, mint levegőben. Emellett a karbonátosodás sebességét befolyásolja még a környezet hőmérséklete is, mely a diffúzió sebesség hőmérsékletfüggése mellett a kémiai reakciók hőmérsékletfüggésével magyarázható.

Minél nagyobb mennyiségű $\text{Ca}(\text{OH})_2$ áll rendelkezésre a betonban, annál jobban akadályozza a CO_2 behatolását a beton mélyebben fekvő részeibe, hiszen a felső rétegben levő kalcium-hidroxiddal lép reakcióba a széndioxid.

A vasbeton szerkezetet körülvevő széndioxid koncentrációja is jelentősen befolyásolja a karbonátosodás sebességét. Minél nagyobb a környezet CO_2 koncentrációja, annál gyorsabb a karbonátosodás sebessége.

A karbonátosodás előrehaladásának sebessége kezdetben nagyobb, majd folyamatosan csökken, mert a már karbonátosodott, tömörebb réteg a széndioxid behatolását akadályozza (2.15. ábra).



2.15. ábra: Karbonátosodás mélysége az idő és a beton nyomószilárdságának függvényében [ffstatika.blog.hu]

A karbonátosodási mélység meghatározásához a **fib** Model Code 2010 [fib MC2010] egy olyan képletet javasol, mely többek között figyelembe veszi a karbonátosodási sebesség csökkenését az idő függvényében, a környező levegő széndioxid koncentrációját, illetve a környezeti tényezőket:

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R_{\text{NAC},0}^{-1} \cdot C_s} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)$$

ahol:

$x_c(t)$ karbonátosodási mélység a t időpontban [mm],

t	idő [évben],
k_e	környezeti paraméter [-],
k_c	kivitelezési körülményekkel kapcsolatos paraméter [-],
C_s	CO ₂ koncentráció a levegőben [kg/m ³],
$W(t)$	időjárási tényező [-],
$R_{NAC,0}^{-1}$	beton hatékony karbonátosodással szembeni ellenállásának inverze [(mm ² /év)/(kg/m ³)]:

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t$$

ahol:

$R_{ACC,0}^{-1}$	ACC gyorsított karbonátosodási teszttel meghatározott hatékony karbonátosodással szembeni ellenállás inverze egy t_0 időpontban, száraz beton esetén [(mm ² /év)/(kg/m ³)]. <i>A fib Model Code 2010 alapján az $R_{ACC,0}^{-1}$ értéke függ a víz-cement tényezőtől. CEM I esetén $3 \cdot 10^{-11}$ és $15 \cdot 10^{-11}$ (m²/s)/(kgCO₂/m³) között változhat, míg pernye kiegészítő anyagos CEM I cement esetén 0 és $17 \cdot 10^{-11}$ (m²/s)/(kgCO₂/m³) között változhat. CEM III cement esetén $8 \cdot 10^{-11}$ és $80 \cdot 10^{-11}$ (m²/s)/(kgCO₂/m³) közötti érték lehet a víz-cement tényező függvényében,</i>
$R_{NAC,0}^{-1}$	NAC normál karbonátosodási teszttel meghatározott hatékony karbonátosodással szembeni ellenállás inverze egy t_0 időpontban, száraz beton (65% RH) esetén [(mm ² /év)/(kg/m ³)],
k_t	csökkentő tényező az ACC teszt eredményének függvényében [-],
ε_t	ACC teszt pontatlanságaival kapcsolatos feltételezett hiba [(mm ² /év)/(kg/m ³)].

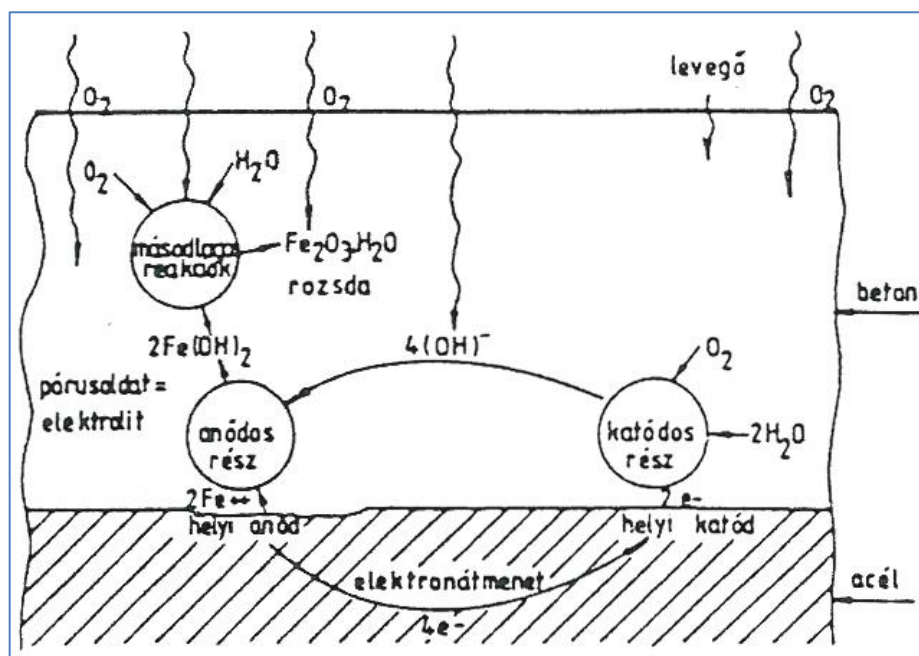
A karbonátosodási mélység modellezéséhez szükséges paraméterek közelítő értékeit a teljes valószínűségi tervezési elvhez a 2.9. táblázat tartalmazza.

Ha a karbonátosodási mélység eléri a betonfedés nagyságát, akkor az acélbetét depassziválódik. A depassziválódást követően, ha a szükséges feltételek teljesülnek, akkor a korrózió során, a vas felületén először vas(II)-hidroxid (Fe(OH)₂) képződik (2.16. ábra), amely vízvesztéssel alakul vörösbarna vas(III)-oxidá (Fe₂O₃), majd további átalakulással rozsdává (FeO(OH)·Fe₂O₃). Az így keletkező rozsdá (trivas-tetraoxid-hidroxid, Fe₃O₄(OH)) móltérfogata akár 5-6-szorosa is lehet az acélénak (2.17. ábra), ezért a környező betonra fesztítő hatást fejt ki [Kausay, 2013]. Ennek hatására repedések alakulhatnak ki a betonban, amin keresztül a víz, illetve az oxigén is akadálytalanul jut el az acélig. (A repedések leromlási folyamatokra való hatásával részletesen a 2.8. fejezetben foglalkozom.)

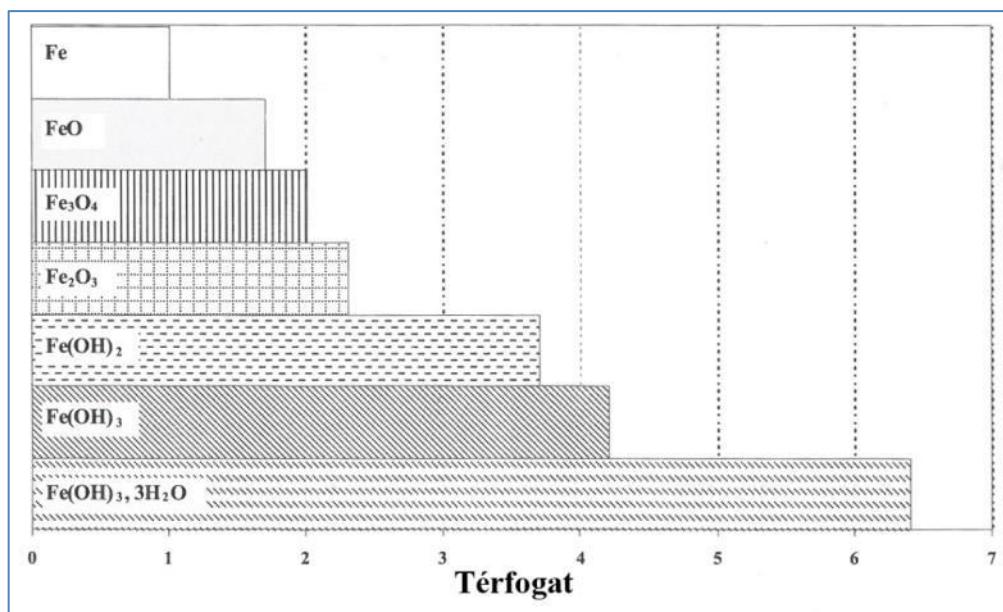
2.9. táblázat: Karbonátosodási mélység modellezésénél felhasználható paraméterek közelítő értéke [fib bulletin 59]

Parameter	Unit	Distribution	Mean	St. dev.	Comment
$R_{ACC,0}^{-1}$	$10^{-11} [m^2/s/kg/m^2]$	Normal	5.2	2	OPC w/b=0.5
ε_t	$10^{-11} [m^2/s/kg/m^2]$	Normal	1	0.15	<i>fib</i> Bulletin 34
k_t	[-]	Normal	1.25	0.35	<i>fib</i> Bulletin 34
$k_e = \left(\frac{1 - (RH_{real})^{f_e}}{1 - (RH_{ref})^{f_e}} \right)^{g_e}$	RH_{ref}	[-]	const	0.65	<i>fib</i> Bulletin 34
	RH_{real}	[-]	WBmax $\omega=1.00$	0.79	exposure condition
	f_e	[-]	const	5	<i>fib</i> Bulletin 34
	g_e	[-]	const	2.5	<i>fib</i> Bulletin 34
$C_s = C_{s,atm} + C_{s,em}$	$C_{s,atm}$	$[kg/m^3]$	Normal	0.00082	0.0001 <i>fib</i> Bulletin 34
	$C_{s,em}$	$[kg/m^3]$	const	0	exposure condition
k_c	b_c	[-]	Normal	-0.567	0.024 <i>fib</i> Bulletin 34
	t_c	[d]	const	1	<i>fib</i> Bulletin 34
$W(t)$	[-]	const	1	-	exposure condition
x_{cover}	[m]	Normal	0.032	0.008	plan documents

Fontos hangsúlyozni, hogy a beton karbonátosodása nem elégséges feltétele az acélbetétek korróziójának megindulásához. Előfordulhat, hogy a karbonátosodási mélység már meghaladja a betonfedés nagyságát, azonban az acélbetétekhez nem jut oda a megfelelő mennyiségű víz és az oxigén.

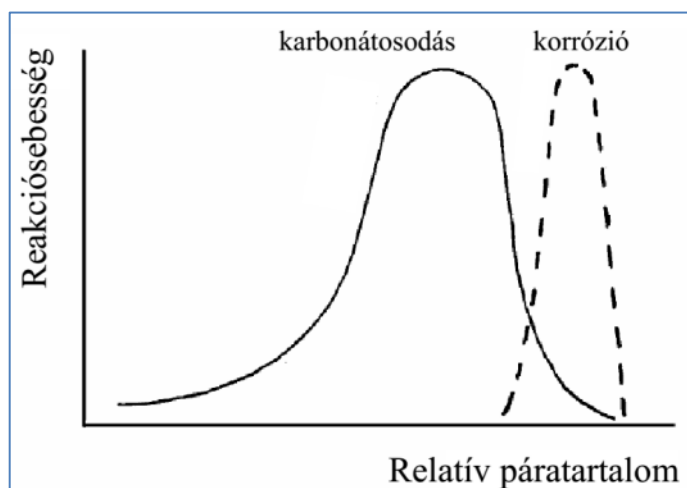


2.16. ábra: Korrózió folyamata a betonban [Tuutti, 1982]



2.17. ábra: Korróziós termék térfogata a vashoz képest [fib bulletin 53]

Megfigyelések alapján a beton karbonátosodása 50-75% relatív páratartalom esetén a legintenzívebb, míg 75% relatív páratartalom fölött a karbonátosodási sebesség nagymértékben lelassul. Az acélbetétek korróziója szempontjából a 80% relatív páratartalom a legkedvezőbb. Ennél kisebb értéknél a betonban levő víz kevés a korrózió fenntartásához, míg ennél magasabb értéknél az oxigén behatolása nehezkessé válik (2.18. ábra) [Balázs et al., 2011].



2.18. ábra: Karbonátosodás és az acélkorrózió sebességének sematikus összefüggése a relatív páratartalommal [Balázs et al., 2011]

A korrózió sebessége akkor a legnagyobb, ha a beton átnedvesedése és kiszáradása gyakran változik. Mivel az elektrokémiai korróziónál egymástól távolabb (0,4nm-nél nagyobb távolságra, de akár 1m távolság is lehet) következik be a katódos és az anódos részfolyamat, így a korrózió sebessége nagy lehet akkor is, ha egyes szerkezeti részek tartósan átnedvesednek, és vele egyidejűleg más helyen oxigén jut a betonacélhoz.

A karbonátosodási mélység meghatározását helyszíni vizsgálattal, 0,1%-os alkoholos fenolftalein oldat segítségével szokás meghatározni a frissen tört betonfelületen.

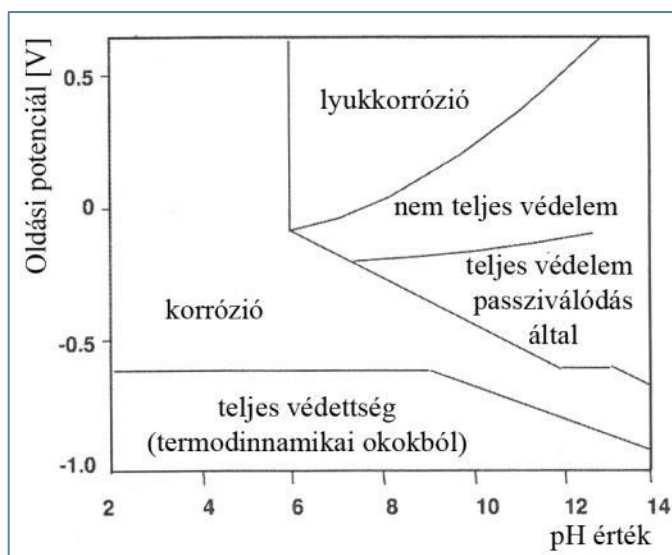
Az oldat hatására, azokon a részeken, ahol a $\text{pH}=9$ értéknél nagyobb (nem karbonátosodott a beton) a felület lila színűvé válik, míg a karbonátosodott részeken a beton színe nem változik meg (2.19. ábra).



2.19. ábra: Hozzávetőlegesen 1cm karbonátosodási mélység kimutatása fenolftalein oldat segítségével (Képek készültek: 2013. 10. 16.)

2.8. Kloridion-tartalom okozta acélkorrózió

A kloridionok az előző fejezetben ismertetett korróziós mechanizmust megváltoztatják. A korrózió akkor is kialakulhat, ha a karbonátosodás mélysége nem érte el az acélbetéteket (2.20. ábra).

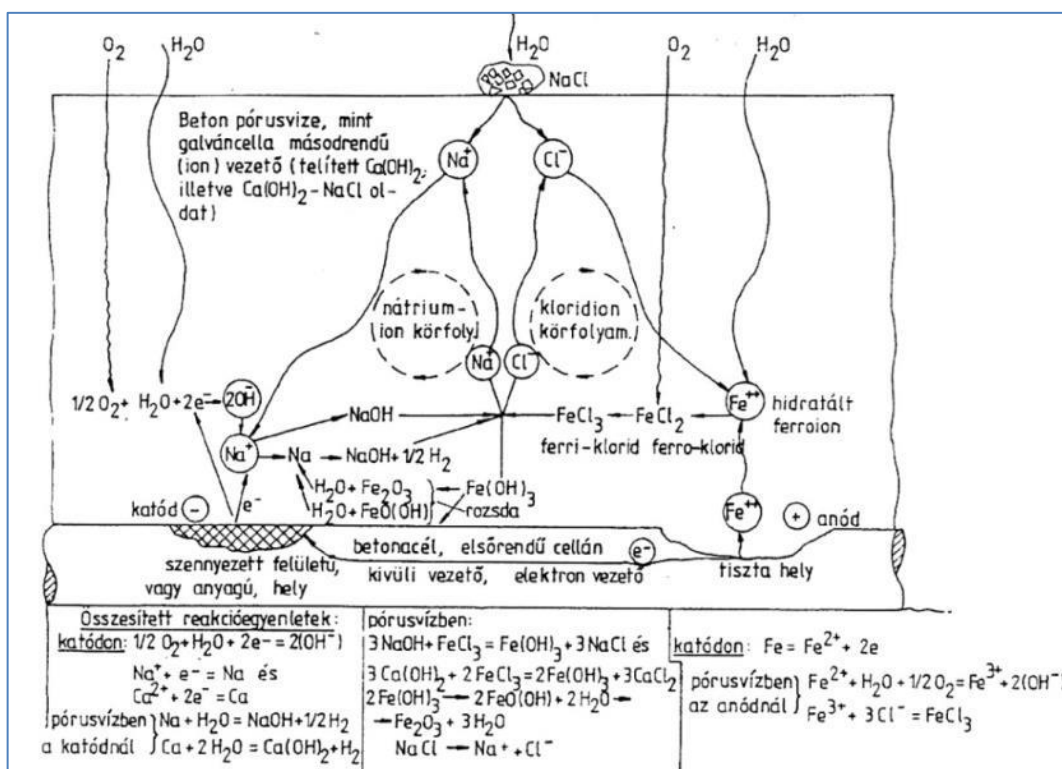


2.20. ábra: Acél Pourbaix diagramja kloridion oldatban [fib bulletin 49]

A kloridionok okozta korrózió pont-, vagy lyukkorrózió formájában következik be. A lyukkorrózió jellegzetessége, hogy a lyuk átmérője lényegesen kisebb, mint a mélysége. Emellett a lyukkorrózió nem jár térfogat-növekedéssel, ami különösen veszélyessé teszi. Ennek hatására az acélbetét belseje úgy fogy, hogy látszólag a betonfelületen semmilyen jele nincs a hibának. Kis betonfedés esetén, illetve a

szabadban levő betonacélon tekő alakú, rozsdabarna korróziót is okozhatnak [Kausay, 2013].

A korrózióhoz kloridion mellett ebben az esetben is szükség van oxigénre és vízre (2.21. ábra). Mivel a gyakorlatban az anódként és katódként működő részek között akár 1 m távolság is lehet, így könnyen előfordulhat, hogy a száraz részek működnek katódként és a kloridion hatásának kitett, oxigénnel rosszul ellátott részek működnek anódként.



2.21. ábra: Korróziós folyamat NaCl tartalom esetén [Balázs - Erdélyi - Kovács, 1991]

Ahogy a 2.21. ábrán is megfigyelhetjük, a kloridion okozta korrózió nál az egyik legnagyobb probléma, hogy a kloridion nem használódik fel, hanem részt vesz a reakcióban, majd a reakció végén újra felszabadul és új korróziós folyamatot okoz.

Mivel a kloridionok (pl.: NaCl 76% relatív nedvességtartalom fölött) nedvszívók, a környezetükből vizet vesznek fel, így drasztikusan növelik az anód környezetének nedvességtartalmát.

A passzíválódott réteg ott sérül meg, ahol a beton többnyire nedves. A kloridion hatásra a nedvességekonzentráció növekszik és ezzel együtt az oxigénellátottság romlik, míg a környező beton vezetőképessége nő. A korrózió erre a tartományra koncentrálódik. A helyi pH érték drasztikusan leesik, míg a katód környezetében a pH érték inkább nő [Kocsányiné Kopecskó, 2004].

A kloridion betonba jutásának három alapvető lehetősége van:

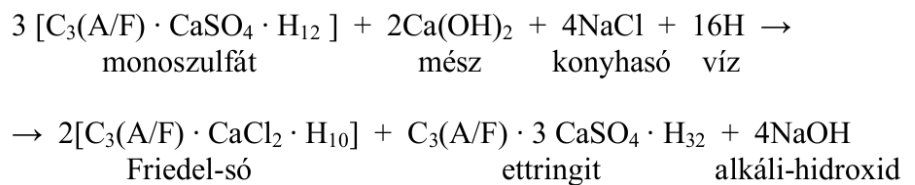
- diffúzió,

- kapilláris felszívás,
- penetráció.

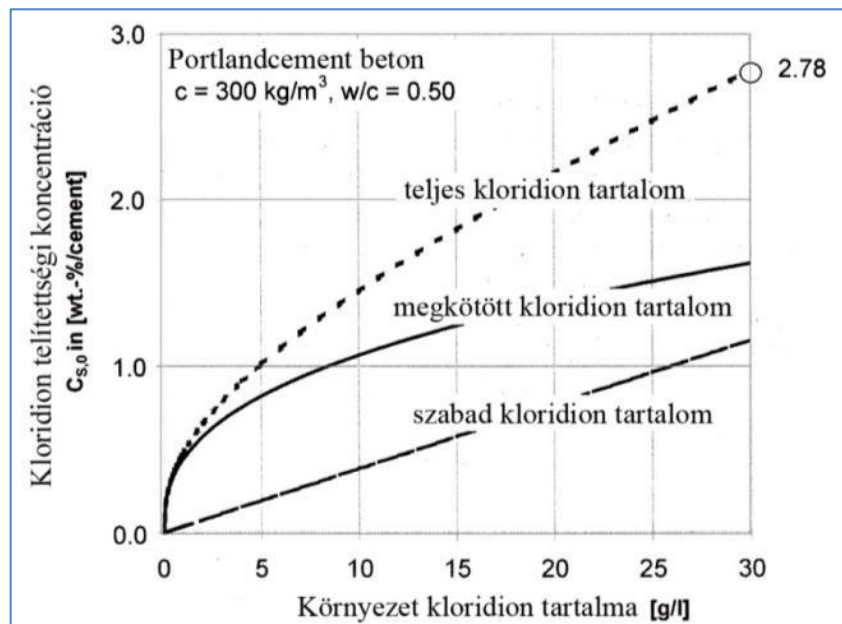
A kloridion diffúziója a beton telített állapotában következik be, amikor a pórusvízbe diffundál. A kapilláris felszívás is nagyon hatásosan szállítja a kloridiont, főleg ahol gyakran bekövetkezik a nedvesedés és kiszáradás. A penetráció nagy víznyomás esetén következik be. Például az ivóvízben levő kloridionok penetráció útján jutnak be a betonba a 8-10 bar nyomás hatására.

A klinkerásványok, illetve a cement a kloridionokat stabil vegyületként (kalcium-kloroaluminátként, azaz Friedel-sóként, vagy kalcium-kloroaluminát-ferritként, azaz Friedel-só vasanalójaként) képes megkötni. Ez a kötött formája a kloridionoknak a C_3A , illetve a C_4AF klinkerásványok és a kloridionok közötti reakció során jön létre. Friedel-só, illetve Friedel-só vasanalógja csak akkor keletkezik, ha valamelyik hidrát elbomlik [Kocsányiné Kopecskó, 2006].

A Friedel-só keletkezésénél a következő mechanizmus tételezhető fel [Balázs et al., 2011]:



A betonban az a kloridion okoz korróziót, amelyik a cement alkotói által nincs megkötve, tehát a betonban oldott állapotban van [Neville, 1995].



2.22. ábra: A beton kloridion telítettségi koncentrációja a környezet kloridion-tartalmának függvényében [fib bulletin 34]

A 2.22. ábrán megfigyelhető a beton kloridion telítettségi koncentrációja a környezet kloridion-tartalmának függvényében. Továbbá megfigyelhető, hogy a teljes kloridion-tartalomnak a növekedésével a megkötött kloridion-tartalom is nő.

Az átalakulás során a monoszulfát ettringitté alakul vissza, míg nátrium-hidroxid (NaOH) szabadul fel, mely növeli az alkáli-adalékanyag reakció veszélyét.

A kémiaiilag kötött kloridion mennyisége függ a cementfajtától. A cement C_3A tartalma jelentősen befolyásolja a kloridion megkötő képességet. A szulfátálló portlandcementek (mai jelöléssel pl.: CEM I 42,5 N-S cementek) kis C_3A tartalmuknak köszönhetően szulfátállóak, viszont kloridion megkötő képességük kicsi.

Kausay [2013] alapján a karbonátosodott zónában a szilárd beton már nem köti meg a kloridiont, így nagy karbonátosodási mélység esetén veszélyeztetettebb a beton a kloridion okozta korrózióval szemben is.

Az acélbetét korróziója csak akkor lép fel, ha a vasalás mélységébe lejutó kloridion mennyisége egy kritikus határértéket túllép. Schießl és Raupach [1990] szerint kritikus az a kloridion-tartalom, amelynél az acélbetét felülete depassziválódik, és megkezdődik a vas oldódása, függetlenül attól, hogy a betonfelületen a rozsdásodás látható-e.

Többféle kísérleti eljárás létezik a kritikus kloridion-tartalom meghatározására, melyek eredménye eltérhet egymástól. A kísérleti eljáráson túl fontos, hogy a teljes kloridion-tartalmat, vagy a szabad, le nem kötött kloridion-tartalmat vizsgáljuk.

Ahhoz, hogy megkezdődjön a kloridion okozta lyukkorrózió, magas kloridion-tartalomra és a következő egyenlet teljesülésére van szükség [fib bulletin 49]:

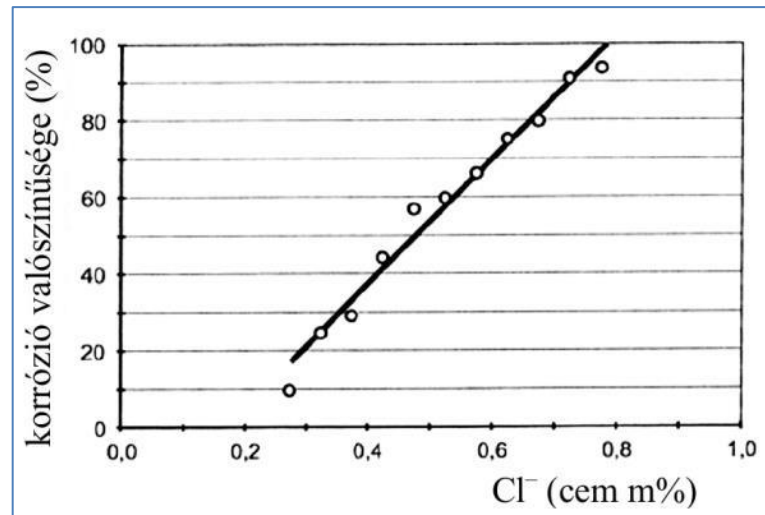
$$\log c_{cl,crit} = 1,5 \log c_{OH} - 0,245$$

ahol: $c_{cl,crit}$ = kloridion koncentráció, ahol a lyukkorrózió lehetséges,
 c_{OH} = hidroxid (OH^-) koncentráció.

Sok esetben a teljes kloridion-tartalmat határozzák meg, és az alapján adják meg a kritikus kloridion-tartalmat. (Még egyszer hangsúlyozni kell, hogy korróziót csak a pórusvízben levő, nem kötött kloridion okoz.)

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.2.7. szakasza [MSZ 4798-1:2004] fesztített vasbeton szerkezetekre, melyek nedvességtől nincsenek elzárva 0,1 m% legnagyobb kloridion-tartalmat enged meg a cement tömegére vonatkoztatva.

Breit [1997] szerint a cement tömegére vonatkoztatott 0,75 m% kloridion-tartalomig, a korróziós kockázat lineárisan nő (2.23. ábra). Míg a cementre vonatkoztatott 0,85 m% teljes kloridion-tartalom már az acél felületén felületi korrózióhoz vezet.



2.23. ábra: Lyukkorrózió kialakulásának valószínűsége [Breit, 1997]

A betonba behatoló kloridion-tartalom meghatározásához a **fib** Model Code 2010 [fib MC2010] a következő képletet javasolja:

$$C(x,t) = \left[C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right) \right] \right]$$

ahol:

- C_0 kloridion-tartalom a cement tömegének %-ban [$m_c\%$]
- x felülettől való mélység [m],
- t beton kora [s],
- C_0 kezdeti kloridion-tartalom a cement tömegére vonatkoztatva a betonban [$m_c\%$],
- $C_{s,\Delta x}$ kloridion-tartalom a cement tömegére vonatkoztatva a Δx mélységben [$m_c\%$],
- Δx konvekciós zóna [m],
- $D_{app,C}$ látszólagos kloridion diffúziós együttható a betonban [m^2/s],

$$D_{app,C}(t) = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t)$$

ahol:

- $D_{RCM,0}$ kloridion migrációs együttható [m^2/s],
- k_e környezeti paraméter [-],
- k_t vizsgálati módszer paramétere [-],
- $A(t)$ öregedési paraméter [-],

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a$$

ahol:

- t beton kora [s],
 t_0 referencia beton kora [s],
 a idő kitevő [-].

A 2.10. táblázatban megtalálható az a , t_0 , k_t , k_e , C_0 , $C_{s,\Delta x}$, Δx közelítő értékét, melyet a teljes valószínűségi modell számításánál javasolnak alkalmazni a kloridion-tartalom meghatározásához.

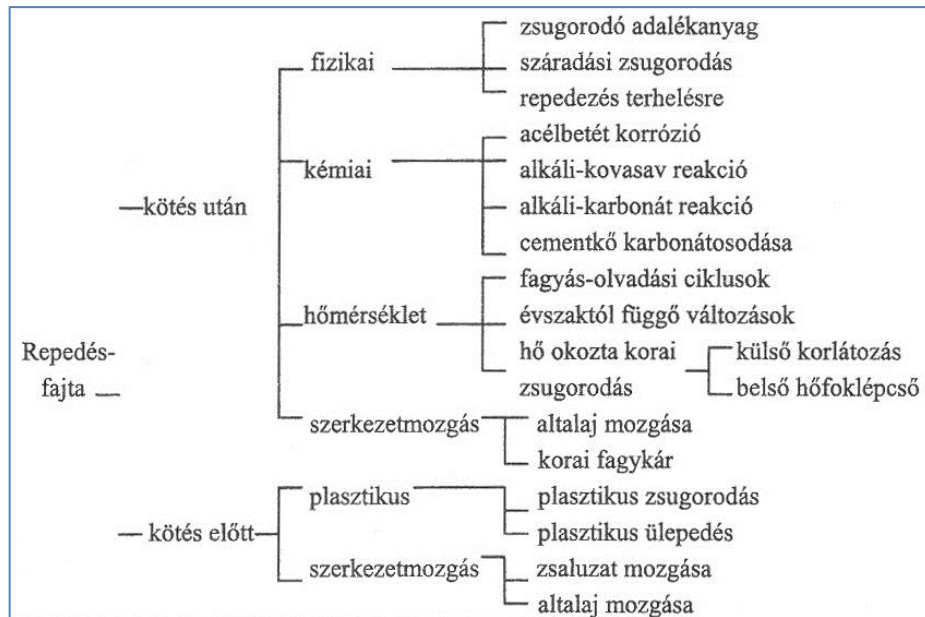
2.10. táblázat: A kloridion-tartalom teljes valószínűségi modelljének alkalmazása során használható paraméterek értéke [fib bulletin 59]

Parameter	Unit	Distribution	Mean	St.Dev.	Comments
$D_{RCM,0}$	$[10^{-12} \text{m}^2/\text{s}]$	Normal	16	3	<i>fib</i> Bulletin 34
a	[-]	Beta $0 \leq a \leq 1$	0.3	0.12	<i>fib</i> Bulletin 34
t_0	[years]	-	0.0767	-	<i>fib</i> Bulletin 34
t_{insp}	[years]	-	25	-	age of concrete
k_t	[-]	-	1	-	<i>fib</i> Bulletin 34
k_e	T_{ref}	[K]	293	-	<i>fib</i> Bulletin 34
	T_{real}	[K]	282	3	exposure condition
	b_e	[K]	4800	700	<i>fib</i> Bulletin 34
C_0	[wt.-%/c]	-	0	-	concrete composition
$C_{s,\Delta x}$	[wt.-%/c]	Lognormal	1.6	1.1	<i>fib</i> Bulletin 34
Δx	[mm]	Beta $0 \leq \Delta x \leq 50$	8.9	5.6	<i>fib</i> Bulletin 34
C_{crit}	[wt.-%/c]	Beta $0 \leq C_{\text{crit}} \leq 2$	0.6	0.15	<i>fib</i> Bulletin 34
x_{cover}	[mm]	Normal	32	8	plan documents

2.9. Repedések hatása a leromlási folyamatra

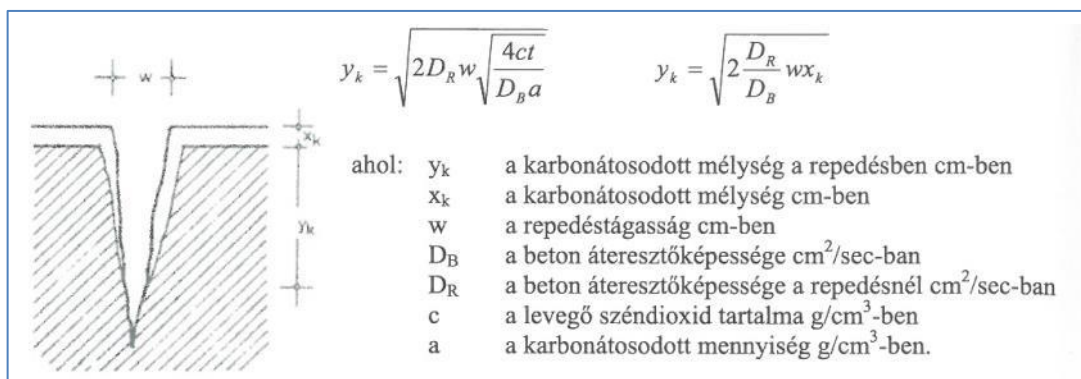
Már a XX. század elején több kutató is felfigyelt a repedések tartósságra gyakorolt kedvezőtlen hatására. 1916-ban Perkhulm megállapította, hogy a berepedt gerendákon rozsdásodás nyomai vannak, míg a repedésmentes gerendákon nincsen [Balázs - Lublóy, 2008]. Ezt a jelenséget Perkhulm a repedések közelében levő beton karbonátosodásával magyarázta. Az 1957-es stockholmi RILEM szimpózium témái között már megjelent a repedéstágasság és a tartósság összefüggésének kérdésfelvetése is.

A betonban nagyon sok ok miatt keletkezhetnek repedések. A 2.24. ábrán csoportosítva láthatók a repedések fajtái és azok keletkezésének okai.



2.24. ábra: Repedések fajtái és okai [Ujhelyi, 2005]

A repedések környezetében a karbonátosodás folyamata felgyorsulhat, mivel a repedéseknél új nyitott betonfelület alakul ki, ahol lehetőség van a széndioxid behatolására. A 2.25. ábrán látható, hogy a repedésnél a karbonátosodási mélység nagyobb lehet, mint az ép betonfelületen.

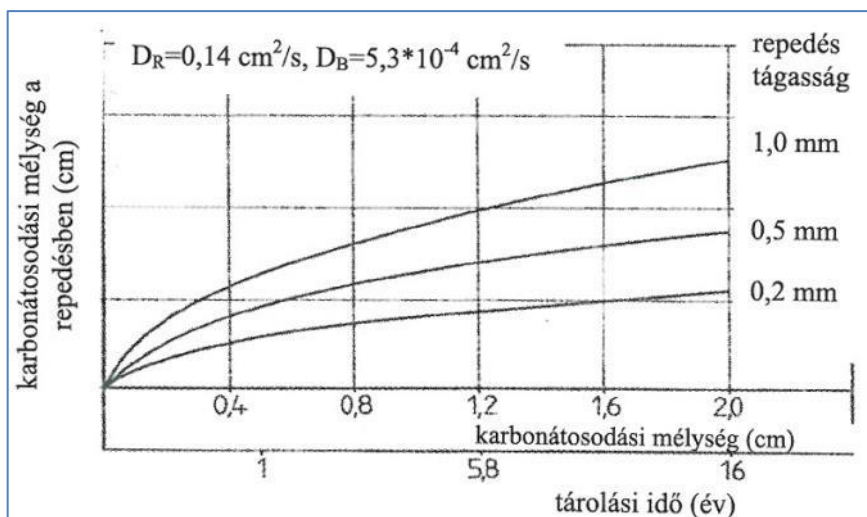


2.25. ábra: Karbonátosodási mélység a repedés környezetében [Balázs - Lublőy, 2008]

Ahogy a 2.26. ábrán látható, a repedésben tapasztalható karbonátosodási mélység nagymértékben függ a repedéstágasságtól, illetve a tárolás időtartamától.

Balázs, Lublőy [2008] alapján a betonszilárdság növekedésével a betonacél védelme csak a repedésmentes tartóknál nő meg, a berepedt tartók esetén ez nem igaz.

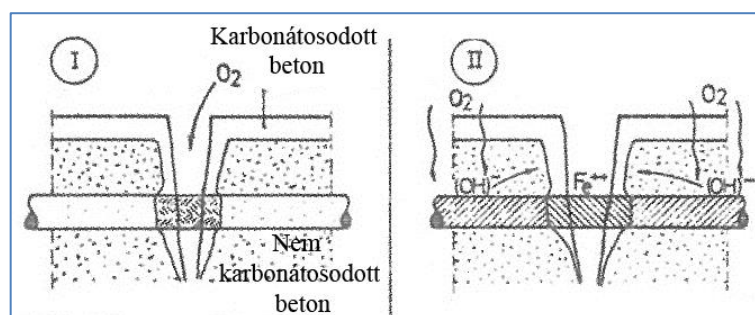
A szerkezet tartósságát jelentősen befolyásolhatja az is, hogy a repedések hogyan helyezkednek el az acélbetétekhez képest.



2.26. ábra: Karbonátosodási mélység a repedéstágasság és a tárolási idő függvényében [Schießl, 1976]

A keresztirányú repedések esetén két fajta korróziót különböztethetünk meg [Balázs - Lublóy, 2008] (2.27. ábra):

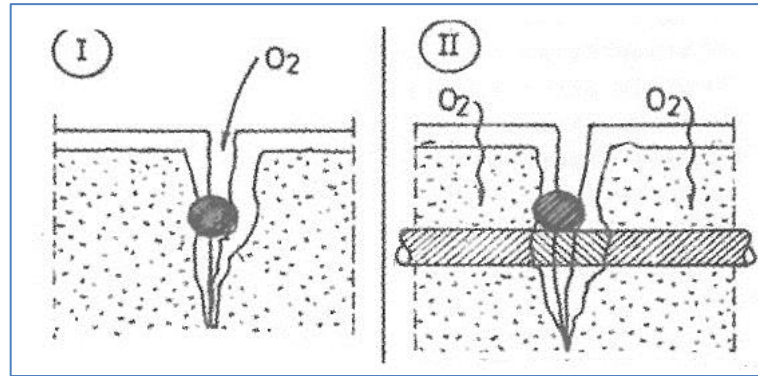
- I) a katód és az anód egymás közvetlen környezetében van és az oxigén a repedéseken keresztül jut az acélbetétekhez. Ebben az esetben az acélbetétek korróziójának mértékét befolyásolja a repedéstágasság, betonfedés nagysága, illetve a beton vízháztartása,
- II) a katód a repedéseken kívül helyezkedik el, míg az anód a repedésekben. Ilyenkor a korrózióhoz szükséges oxigén a repedésmentes betonon keresztül jut el az acélbetétekig. Ebben az esetben a beton áteresztőképessége nagyobb szerepet játszik, mint a repedéstágasság.



2.27. ábra: Korróziós folyamat alakulása keresztirányú repedés esetén [Schießl, 1976]

A hosszirányú repedések esetén ugyancsak két esetet különböztethetünk meg [Balázs - Lublóy, 2008] (2.28. ábra):

- I) ha a hosszirányú acélbetét nem érintkezik a keresztirányú vasalással, akkor a katód és az anód a repedésben található,
- II) ha a hosszirányú vasalás érintkezik a keresztirányú vasalással, akkor a keresztirányú vasalás kapcsán ismertett korróziós módok alakulhatnak ki.

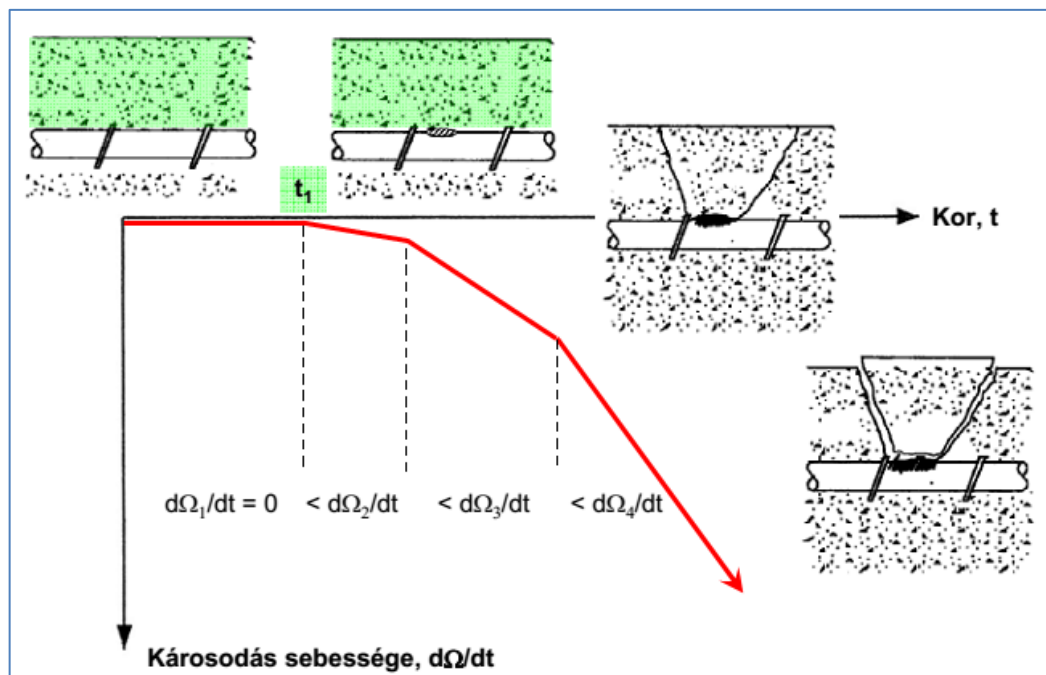


2.28. ábra: Korróziós folyamat alakulása hosszirányú repedés esetén [Schießl, 1976]

A repedés iránya nem csak az acélbetét korróziója szempontjából lényeges. A hosszirányú repedések hatására a vasbeton szerkezet tapadása, illetve nyírószilárdsága is jelentősen csökkenhet.

A betonacél korróziója során keletkező vasoxid nagyobb térfogata miatt a betonban húzófeszültség keletkezhet, melynek hatására a beton megreped, illetve repedéstágassága nő. A repedés miatt a vasbeton szerkezet leromlása felgyorsul. A repedések kialakulásával a vasbeton szerkezetek károsodásának sebessége megnő (2.29. ábra). A repedések kialakulását követően a további térfogat növekedés miatt a betonfedés leválhat, mellyel a leromlási folyamat tovább gyorsul. A repedések kialakulása, és a betonfedés leválása is nagymértékben függ a betonfedés nagyságától.

Ezek alapján érthetővé válik, hogy miért van óriási jelentősége a betonfedésnek a karbonátosodás, illetve az acél korróziója tekintetében.



2.29. ábra: Beton károsodási sebességének változása a repedés kialakulásával [Balázs-Borosnyói, 2013-I.]

Lindquist, Darwin, Browning, Miller [2006] kutatása alapján a repedéseknek a kloridion okozta korrózió szempontjából is nagy jelentősége van. A vizsgálatuk során azt tapasztalták, hogy a repedésmentes hídszerkezet esetén a kloridion koncentráció a küszöbértéket 12 év alatt érte el, míg a berepedt tartónál ez az időtartam 2 év volt.

Amellett, hogy a betonban keletkező repedések elősegítik a betonacélok korrózióját, a berepedt betonok fagyállósága is jelentősen csökken. A repedésekbe bejutó víz megfagyása közbeni térfogat növekedés hatására a repedéstágasság növekedhet, esetlegesen a beton egyes részei leválhatnak. Ezt követően pedig a vasbeton szerkezet leromlása még tovább gyorsulhat.

A repedéseken keresztül a betonkorróziót okozó anyagok (pl.: savak, lágyvíz, szulfátok) is mélyebbre hatolhatnak a betonban, illetve nagyobb felületen tudnak a betonba beszivárogni, így a betonkorrózió szempontjából is károsak lehetnek a repedések.

Ezek alapján látható, hogy az egyes leromlási folyamatok egymás hatását erősíthetik. Ha a betonban valamilyen okból repedés alakul ki, akkor a leromlás folyamat intenzitása fokozódhat, melynek hatására a repedéstágasság tovább nőhet. Így kiemelt jelentősége van a tartósság, illetve az állapotromlás szempontjából a repedésképződésnek, illetve a repedéstágasságnak is.

3. LEROMLÁSI FOLYAMATOK BEMUTATÁSA ÉS ELEMZÉSE SAJÁT VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ALAPJÁN

Amint a bevezetőben is olvasható, hazánkban 1969 és 1988 között hozzávetőlegesen 360 km hosszban (5 m-es névleges hosszú csőelemekkel) gyártottak Sentab típusú feszített vasbeton csöveket, melyek tervezési élettartama 50 év volt. Az 50 év közeledtével fokozott figyelmet kell fordítani a Sentab típusú csőelemek állapotvizsgálatára, hogy el lehessen kerülni a csőelemek váratlan tönkremenetelét.

A lehetséges leromlási folyamatok áttekintése (2. fejezet) során bemutattam, hogy mekkora jelentősége van a felhasznált anyagoknak, gyártástechnológiának a leromlási folyamatok szempontjából, hiszen többek között ezek határozzák meg, hogy mely mechanizmusok lesznek mértékadóak a szerkezet állapotromlása szempontjából. A gyártás közbeni ellenőrzések tanulmányozásával pedig következtetni lehet az esetleges gyártási hibák veszélyére, melyek felgyorsíthatják a csövek állapotromlását.

Ennek megfelelően a Sentab típusú feszített vasbeton csövek állapotromlásának elemzéséhez összefoglaltam a csőelemek gyártástechnológiáját. Terjedelmi korlátok miatt a csőelemek típusait, gyártásukkor felhasznált anyagokat, gyártástechnológiájukat, illetve a gyártás során végzett ellenőrzéseket az *M.1. mellékletben* ismertetem.

A leromlási folyamatok vizsgálatához először fontos tisztáznunk, hogy milyen környezeti hatások érhetik a szerkezetet. Azok a hatások vajon elősegítik, vagy éppen gátolják a beton, illetve a feszítőbetétek korrózióját. Ennek megfelelően röviden ismertetem az üzem alatt levő Sentab csöveket várhatóan érő környezeti hatásokat.

3.1. Sentab típusú nyomócsöveket érő környezeti hatások

A Sentab típusú csövek talajban kerültek beépítésre, így a beton leromlása kapcsán szóba jöhet a **szulfátos víz, illetve gáz okozta duzzadásos betonkorrózió** lehetősége.

Ahogy az *M.1. mellékletben* ismertettem, a Sentab csövek gyártásához szulfátálló, S54 típusú cementet használtak fel. *(Az S54-es szulfátálló cement ezen a néven már nincs forgalomban. A szulfátálló cementek esetén az egyik legfontosabb mérőszám az alumínát modulus [AM], mely a cementekben megtalálható két oxid mennyiségének hányadosából (Al_2O_3/Fe_2O_3) adódott. Korábban az alumínát modulusra a szabvány $AM < 0,64$ -et írt elő. A lábatlani cementgyár a biztonság kedvéért $AM < 0,54$ -et teljesítő cementet gyártott, melyet S54-nek nevezett [Csányi et al., 2013]. Ez alapján a Sentab csövek esetén kicsi az esélye a szulfátduzzadásos betonkorróziónak.*

A talajban levő szerkezetek esetén is fennáll az **oldódásos betonkorrózió** veszélye, mind a talajvízzel érintkező felületeken, mind a csőben áramló víz hatására.

A hazánkban felhasznált adalékanyagok túlnyomórészt nem hajlamos **alkáli-adalék reakcióra**, így ennek veszélye minimális.

Általános esetben a vasbeton szerkezetek leromlása kapcsán foglalkozni kell a **fagy okozta leromlási folyamatokkal** is. Mivel a Sentab csövek legalább 1 méter mélyen vannak a föld alatt, így ezek veszélye elhanyagolható.

A vízcsövek esetén számolni kell a bennük áramló **víz koptató hatásával**. A csövek betonjához $500\text{--}550\text{ kg/m}^3$ cementet és $0,35\text{--}0,38$ víz-cement tényezőt használtak, így viszonylag kicsi a veszélye a cső kopásának.

Egy vasbeton szerkezet leromlása kapcsán fontos a **karbonátosodás** kérdése. Mivel a vizsgálandó szerkezet a földben található, ahol nedves, ritkán száraz körülmények vannak, így a vele szemben támasztott követelmény – a ma érvényben levő előírások alapján – XC2 osztály *(melybe pl.: az épületalap, támfalalap, mélyalap, kiegyenlítő lemez tartozik)* lenne új építés esetén. A karbonátosodás noha a nedves környezet, illetve a földdel való takartság miatt csak korlátozottan hat a szerkezetre, a csövek leromlási folyamatának vizsgálatakor mindenképpen foglalkozni kell vele.

A Sentab csövek a talajban, a hozzáférhetőség biztosítása végett az úttestek, illetve járdák alatt kerültek elhelyezésre. Hazánkban hosszú ideig szinte kizárólag NaCl-ot (nátrium-kloridot), illetve homokot használtak síkosság mentesítésre. Tehát a Sentab csöveket nagy mennyiségű **kloridion** érthette a közutak alatt. Azóta környezetvédelmi megfontolásokból több alternatív síkosság mentesítő módszert dolgoztak ki, melyek környezetkárosító hatása kisebb.

2010 óta többször elhangzott, hogy a jégmentesítés során tilos NaCl-ot használni. A jelenleg hatályban levő jogszabályokat tanulmányozva egyedül a következő előírást találtam a síkosság mentesítéssel kapcsolatban:

346/2008. (XII. 30.) Korm. rendelet a fás szárú növények védelméről, 5. § „(2) Belterületi közterületen - a közúti forgalom számára igénybe vett terület (úttest) kivételével - a *síkosság-mentesítésre olyan anyag használható, amely a közterületen vagy annak közvetlen környezetében lévő fás szárú növény egészségét nem veszélyezteti*” [346/2008. Korm. rendelet]. Ebből az következik, hogy a települések saját hatáskörükben rendelkezhetnek az utak síkosság mentesítésével kapcsolatban.

Emellett a következő nyilatkozatot találtam a közlekedési klub honlapján [autovezetes.network.hu, 2010]: „A sózás megkerülhetetlen: Magyarország mindenki azzal olvasztja a jégét, amivel akarja, nincs ugyanis síkosság-mentesítésre vonatkozó egységes EU-szabályozás és nem is terveznek ilyet. Ennek fő oka, hogy a tagállamok eltérő éghajlati és úthálózati adottságokkal rendelkeznek, ezért értelmetlen lenne az egységes szabályozás. Noha léteznek alternatív megoldások, az ország legtöbb konyhasóját kiszóró Fővárosi közterület-fenntartó Rt. ragaszkodik a nátrium-kloridhoz.

Pfeifer Zsuzsa, az FKF környezetvédelmi osztályának vezetője az [origo]-nak azt mondta, a sózás megkerülhetetlen, és nemcsak nálunk, hanem valamennyi hasonló éghajlatú országban ez a legjellemzőbb síkosság-mentesítési mód. "Sok fagyáspontcsökkentő anyag létezik, de mindegyik sokkal drágább, mint a nátrium-

klorid, és a környezetre gyakorolt kedvezőbb hatásuk sem számottevő" - mondta hozzátéve, hogy a FKF a legkorszerűbb módon végzi munkáját.

A nátrium-kloridon, illetve a homokkal kevert són kívül egyéb vegyszereket is használ a vállalat, például kalcium-kloridot, zeolitot, kálium-kloridot. Ezek a szerek bizonyos környezeti elemekre kedvezőbben hatnak: kalcium-kloridot szórnak például az Üllői úton, a Kálvin téren, a Könyves Kálmán körúton és védett fasorok közelében.”

A nyilatkozatból kiderül, hogy több alternatív síkosság mentesítő anyag is tartalmaz kloridiont, illetve jelenleg jelentős mennyiségű NaCl-ot használnak fel az utak síkosság-mentesítésére.

Nem szabad azt sem elfelejteni, hogy az ivóvíz is tartalmaz kloridot, mely a betonba bejutva ugyancsak hozzájárulhat a feszítőhuzalok korróziójához. Ennek hatását tovább erősíti, hogy a csövekben levő víz 8-10 bar nyomáson áramlik, ami elősegíti a betonba való behatolását is.

3.1. táblázat: Ivóvíz klorid tartalma és pH értéke Budapesten [vizmuvek.hu adatait felhasználva] és Pécsen [tettyeforrashaz.hu adatait felhasználva]

	Budapest									
	I. Ker.	II. Ker.	III. Ker.	IV. Ker.	V. Ker.	VI. Ker.	VII. Ker.	VIII. Ker.	IX. Ker.	X. Ker.
Klorid [mg/l]	21	23	21	21	20	21	20	21	22	21
pH	7,62	7,59	7,61	7,61	7,63	7,62	7,63	7,64	7,62	7,63

	Budapest									
	XI. Ker.	XII. Ker.	XIII. Ker.	XIV. Ker.	XV. Ker.	XVI. Ker.	XVII. Ker.	XVIII. Ker.	XIX. Ker.	XX. Ker.
Klorid [mg/l]	22	21	22	21	21	21	23	27	25	27
pH	7,55	7,58	7,6	7,63	7,64	7,63	7,62	7,55	7,48	7,46

	Budapest			Pécs
	XXI. Ker.	XXII. Ker.	XXIII. Ker.	
Klorid [mg/l]	27	27	29	20
pH	7,46	7,51	7,45	7,14

Az ivóvízben található kloridion-tartalom határértéke 100 mg/l, melynek ténylegesen csak hozzávetőlegesen egy negyedét tartalmazza az ivóvíz például Budapesten, illetve Pécsen (3.1. táblázat).

Fontos hangsúlyozni, hogy a Sentab csövek gyártásakor S54-es cementet használtak, mely szulfátállóság szempontjából kedvező, azonban – ahogy a 2.7. fejezetben olvasható – a kloridion megkötő képessége kisebb, mint egy hagyományos portlandcementnek.

Ezek alapján a kloridion okozta acélkorrózióval mindenképpen foglalkozni kell a Sentab típusú csövek leromlási folyamatának elemzése során.

3.2. Sentab csöveken elvégzett vizsgálatok

Három éve foglalkozom a Sentab típusú csőelemek állapotvizsgálatával. Ez idő alatt 8 üzem alatti és 10 üzemen kívüli (kiszedett) csőelem állapotvizsgálatában vettem részt.

Üzem alatt a Sentab típusú csövekben 8-10 bar víznyomás van, így kizárólag roncsolásmentes vizsgálatokat lehetett rajtuk végezni. A tervszerű karbantartás, illetve csőtörések miatt kiemelt, rossz állapotú csőelemeken lehetőségünk volt roncsolásos vizsgálatokat is végezni.

Az üzemben lévő csöveken a következő vizsgálatokat végeztük el:

- szemrevételezéssel való állapotfelmérés, hibahelyek felmérése, különös tekintettel: a csövek бүтүс felületének állapotfelmérésére, esetlegesen levált betonrészek vizsgálatára,
- betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése Schmidt-kalapácsos vizsgálattal.

A kivett, üzemen kívüli csöveken az előbb felsorolt vizsgálatokon kívül a következő vizsgálatokat végeztük el:

- karbonátosodási mélység ellenőrzését az észlelt hibahelyek környezetében,
- kloridion-tartalom vizsgálatát a feszítőhuzal mélységéig (több rétegben),
- betonfelület megbontásával elvégzendő vizsgálatokat:
 - betonfedés ellenőrzését véséssel,
 - rozsdafoltok feltárását a leromlási folyamat okainak felderítéséhez,
 - rozsdafoltok alatti feszítőhuzal állapotvizsgálatát,
 - a feszítőbetétek rozsdásodási mélységének meghatározását a tok бүтүс felületén,
- furatpor minta elemzését fázisanalitikai módszerrel – két cső esetén (röntgendiffrakciós és derivatográfias vizsgálattal),
- kijelölt rozsdafoltok vizsgálatát CT (Computer Tomography, azaz számítógépes tomográfia) segítségével,
- testsűrűség és látszólagos porozitás meghatározását (zsaluillesztés közelében levő, illetve általános helyen levő betontakarásnál, valamint beton belsejében).

3.2.1. Szemrevételezéses állapotfelmérés

Minden megvizsgált cső esetén a környezet jellemzőinek rögzítésével kezdtük. Külön figyelmet fordítottam arra, hogy a vizsgált cső út alatt van-e, vagy zöldterület alatt, illetve talajvíznek vannak-e nyomai a cső környezetében, továbbá a környező közműveknek lehet-e hatása, nyílt vizek közelsége hatással lehet-e a cső állapotára.

A cső felületének megtisztítását követően a csövek szemrevételezése következett. Külön vizsgáltam a gyártástechnológia tanulmányozása közben felismert kritikus pontokat:

- zsaluillesztések környezete,

- spirálisan futó feszítőhuzalok végrögzítése,
- műanyag távtartók környezete,
- bütös felületeken a hosszbetétek végei,
- toknyak iránytörésének környezete.

Emellett dokumentáltuk a csövön észlelhető további hibahelyeket is.

A cső felületén többféle alakú, méretű, illetve megjelenésű rozsdafoltot észleltünk. A rozsdafoltok méretének meghatározásához mm pontosságú mérőszalagot, míg a betonfedés, rozsdá magassági méretének, illetve hosszbetétek végénél való méret meghatározáshoz századmilliméter pontosságú tolómérőt használtunk (3.1. ábra). A hibahelyeket fényképes formában is dokumentáltuk, a későbbi elemezhetőség végett.



3.1. ábra: Cső bütös felületén észlelt rozsdafoltnál a rozsdatermék magassági méretének meghatározása tolómérő segítségével (Kép készült: 2013. 07. 17.)

Szemrevételeztük azokat a cső részeket, ahol korábbi javítás nyomát figyeltük meg. Vizsgáltuk, hogy a javítási helyeken vannak-e állapotromlásra utaló jelek, és ha vannak, akkor azoknak mi lehet az oka.

Továbbá szemrevételeztük a csőszakaszok feltárása közben keletkezett hibahelyeket is, ahol a földmunkagép megsértette a betonfedést, vagy esetleg a feszítőbetéteket is deformálta.

3.2.2. Betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése

A betonszilárdság egyenletességének roncsolásmentes vizsgálatát N-típusú Schmidt-kalapáccsal (ütőenergiája $2,207 \text{ N}\cdot\text{m}$) végzett méréssel ellenőriztük.

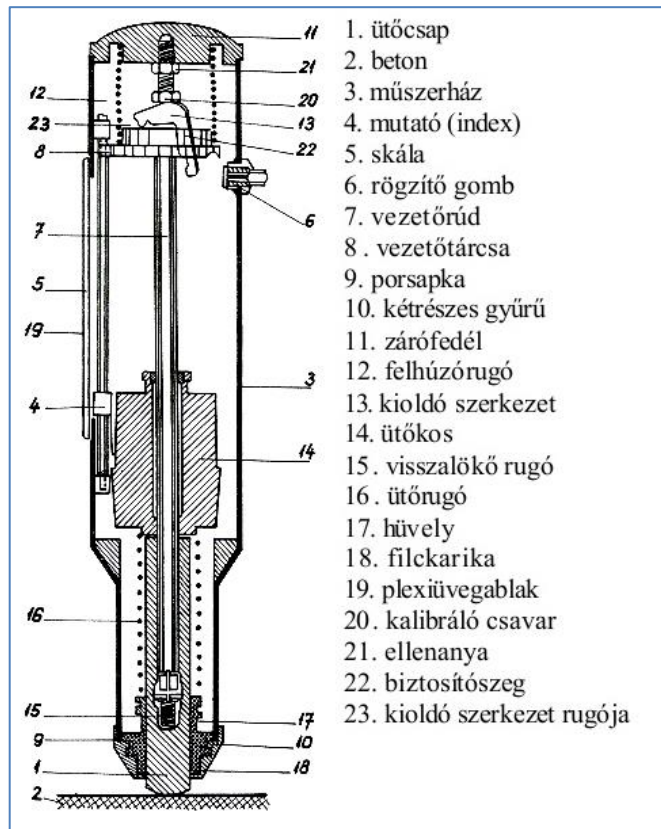
Mivel az üzem alatt levő csöveken nincs lehetőség roncsolásos vizsgálat elvégzésére, így fontos annak tisztázása, hogy önmagában a Schmidt-kalapáccsal végzett szilárdságbecslő eljárás alkalmazható-e.

Kausay [2013] szerint: „A Schmidt-kalapáccsal fűrt magminták alkalmazása nélkül is meg lehet becsülni a betonnak a vizsgálat idején meglévő nyomószilárdságát,

de abból a beton nyomószilárdsági osztályára, vagy készítés kori állapotára következtetni nem szabad”.

Ennek megfelelően a Schmidt-kalapácsos vizsgálat alkalmas lehet a betonszilárdság egyenletességének ellenőrzésére.

„A Schmidt-kalapács rugós szerkezet, amelynek használata során a megfeszített ütőrugó az ütőkost a vizsgálandó felületre illesztett ütőcsaphoz repíti, ahonnan az visszapattan. A számos tényező befolyásolta visszapattanás mértékét, illetve sebességét a beton nyomószilárdságával hozzuk kapcsolatba” [Kausay, 2013]. Az N-típusú Schmidt-kalapács felépítése a 3.2. ábrán látható.



3.2. ábra: N-típusú Schmidt-kalapács felépítése [Kausay, 2013]

A vizsgált csövek felületén, több helyen is megmértük a visszapattanási értéket. Minden egyes mérési helyen 12 visszapattanási értéket határoztunk meg, majd az egyes mérési helyeken mért értékek átlagát kiszámítottuk.

A visszapattanási értékeket az ÚT 2-202.4:1999 Közúti betonok vizsgálata Schmidt-kalapáccsal és ultrahanggal szabvány alapján korrigáltuk (üllőn való visszapattanásnak megfelelő kalibrálás miatti, ütési irány miatti korrekcióval), illetve a karbonátosodás figyelembevételére, egységesen az összes minta esetén alkalmaztunk egy 0,85-ös korrekciós szorzót. Ezt követően összevetettük az egyes vizsgálati helyekre kiszámított, korrigált átlagértékeket. Kiszámítottuk az egyes csöveken elvégzett vizsgálatok átlagértékét, szórását és az átlagos abszolút eltérést. Ebből következtettünk a betonszilárdság egyenletességére.

3.2.3. Karbonátosodási mélység ellenőrzése

Az üzemen kívül helyezett csőelemeken megvizsgáltuk a karbonátosodási mélységet. A vizsgálatához kijelölt területen a betonfedést megvéstük, majd 0,1%-os alkoholos fenoltalein oldatot, porlasztásos módszerrel a friss törésfelületre juttattunk.

Az oldat hatására, azokon a részekon, ahol a $\text{pH}=9$ értéknél nagyobb (nem karbonátosodott a beton) a felület lila színűvé válik, míg a karbonátosodott részekon a beton színe nem változik meg.

A vizsgálatok során ügyeltünk arra, hogy a beton megvését követő 15 percen belül végezzük el a vizsgálatot, hogy a friss betonfelület karbonátosodása ne következhesse be.

Ezt követően meghatároztuk azt a mélységet a cső felületétől mérve, ameddig a fenoltalein oldat hatására nem színeződött el a frissen tört felület.

3.2.4. Kloridion-tartalom vizsgálata nedves analitikai módszerrel

A kloridion mennyiségi meghatározását a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában végeztük Mohr módszerrel. A módszer megértése végett jelen voltam a vizsgálatoknál, de a vizsgálatokat Rónaky Viktória, a tanszék vegyésztechnikusa végezte el.



3.3. ábra: Kloridion-tartalom meghatározása Mohr módszerrel (bal oldali ábra: vöröses-barnáss színű ezüstkromát képződése, jobb oldali ábra: nagy kloridion-tartalom miatt fehér színű csapadék képződött, képek készültek: 2013. 07. 25.)

A vizsgálatához a Sentab típusú csövekből vett furatpor mintát tovább porítottuk, majd 5 g-ot mértünk ki belőle. Az 5 g mintát 50 ml desztillált vízbe raktuk, majd 2 óra elteltével megvizsgáltuk a minta pH értékét. Ezt követően salétromsavval beállítottuk a

közel semleges pH értéket. Végül, kálium-karbonát jelenlétében ezüst-nitráttal titráltuk a mintát. Ezt követően a belecsepegtetett ezüst-nitrát mennyiségéből számítottuk ki a minta kloridion-tartalmát.

A vizsgálandó mintát ismert koncentrációjú ezüst-nitrát oldattal titráltuk. A kloridionok az ezüst(I)-ionokkal oldhatatlan ezüst-klorid csapadékot képeztek. A Mohr módszernél kálium-kromát indikátort kell használni, melyből (miután az összes kloridion elreagált) vöröses-barna színű ezüst-kromát keletkezik (3.3. ábra). A vizsgálat során fontos, hogy a vizsgált oldat kémhatását közel semlegesre állítsuk be, ugyanis nagy pH érték esetén ezüst-hidroxid keletkezik, míg kis pH érték esetén krómsav képződik, ami csökkenti a kromationok koncentrációját, így késleltetve a csapadékképződést.

3.2.5. Betonfedés megbontásával elvégzett vizsgálatok

A szemrevételezés során több olyan hibahelyet észleltünk, melyek okát legegyszerűbben a betonfedés eltávolításával lehetett meghatározni.

A betonfedés eltávolítását véséssel végeztük, és közben fényképes dokumentációt készítettünk az ott tapasztaltakról. Ezt követően tolómérő segítségével meghatároztuk a feszítőhuzalok betonfedését és mérőszalaggal a spirálisan futó feszítőhuzal tengelytávolságát.

A rozsdásodott részeken megbecsültük a feszítőbetétek korróziós tönkremenetelét követő megmaradt keresztmetszet %-os arányát az ép keresztmetszethez képest.

Egy feszítőbetétnél a betét szilikonnal való körbeöntésével készítettünk egy külső lenyomatot, amibe utána viaszt öntve, megkaptuk a feszítőbetét viasz mását (3.4. ábra). A viasz mintát vékony szeletekre vágva jól lehetett vizsgálni a feszítőhuzal tönkremeneteli módját.



3.4. ábra: A feszítőbetét viasz másának készítése (legfölül látható a feszítőbetét körbeöntésekor keletkezett sablon, középen a mintavételhez használt feszítőbetét, míg legalul a feszítőhuzal viaszból készült mása, kép készült: 2012. 08. 08.)

3.2.6. Furatpor minta elemzése fázisanalitikai módszerrel

A furatpor mintát röntgendiffrakciós, valamint derivatográfias vizsgálati módszerrel vizsgáltuk. A vizsgálatokat a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia

Tanszék laboratóriumában végeztük. A fázisanalitikai módszerrel végzett vizsgálatok eredményeinek kiértékelésében Kopecskó Katalin, egyetemi docens segített.

3.2.6.1. Röntgendiffrakciós vizsgálat

Diffrakciós módszerrel a vizsgált mintában jelenlevő kristályos állapotú fázisok vizsgálhatók. A tiszta, referencia fázisokról felvett és adatbázisba rendezett röntgendiffraktogramok segítségével tudják a többfázisú mintákat elemezni.

A rendezettség alacsony foka vagy hiánya esetén röntgenamorf vagy amorf fázisokról beszélünk, melyekről nem a jellegzetes, vonalas diffrakciós képet kapjuk. A cement hidratációja során mind kristályos, mind ún. röntgenamorf fázis is keletkezik [Kocsányiné Kopecskó, 2006].

A fázisok kimutatásának alapja, hogy az egyes kristályos anyagok diffrakciós vonalai egymástól függetlenek, keverékekben minden komponens vonalai megjelennek. Nincs két olyan, egymástól különböző kristályos fázis, amely azonos helyzetű és relatív intenzitású reflexiókkal bírna, így az egyes kristályos anyagok diffrakciós vonalai egyértelműen meghatározzák a vizsgált anyagot [Kopecskó, 2013].

A diffrakciós módszerhez PHILIPS PW 3710 diffraktométert használtunk (3.5. ábra).



3.5. ábra: PHILIPS PW 3710 típusú diffraktométer (Kép készült: 2013. 10. 07.)

3.2.6.2. Derivatográfiás vizsgálat

A mérésekhez Derivatograph Q-1500 D típusú készüléket használtunk. A minta kis mennyiségét megporították, majd inert anyagú (korund vagy platina) tégelybe helyeztük (3.6. ábra), kemencetérben szobahőmérsékletről adott hőmérsékletig egyenletes sebességgel hevítettük. A méréshez néhány $\times 100$ mg tömegű mintára volt szükség. A műszer egyidejűleg hoz létre TG (termogravimetriás), DTA (differenciál termoanalízis) és DTG (derivatív termogravimetriás) jelet. A TG a tömegváltozásról, míg a DTA a hőfelszabadulásról, illetve hőelnyelésről ad információt. A TG görbe első deriváltját, a DTG görbét analóg módon állítja elő a készülék, mely a tömegváltozással

is járó hőreakciók szétválasztásában segít. A három görbét és a hozzájuk tartozó hőmérsékletet tartalmazó vizsgálati eredményt nevezzük derivatogramnak.



3.6. ábra: Derivatograph Q-1500 D készülék (Képek készültek: 2013. 10. 07.)

A három jel összevetéséből következtetni lehet arra, hogy egy adott hőmérsékleten milyen folyamatok játszódnak le, tehát milyen alkotóelemek vannak a vizsgált mintában. Ha ugyanabban a hőmérséklet intervallumban párhuzamos hőreakciók következnek be, a hőreakciót szolgáltató fázisok DTG és DTA csúcsai átlapolódhatnak, többszörös csúcsok vagy inflexiók jelennek meg. Ezekben az esetekben a fázisok azonosítása derivatográfias módszerrel nehézkes vagy nem lehetséges. (Így a derivatográfias vizsgálatot érdemes a röntgendiffrakciós fázisanalízissel együtt alkalmazni, hiszen a röntgendiffrakciós fázisanalízis segítségével azonosíthatók a kristályos állapotú fázisok.) A vizsgált minta azon fázisai, melyek a mérés hőmérséklet intervallumában nem szenvednek el semmiféle hőreakciót, a derivatográfias módszerrel nem elemezhetők [Kopecskó, 2013].

3.2.7. CT vizsgálat és kiértékelése

A számítógépes tomográfiával lehetőség nyílik arra, hogy a kivett mintának a teljes három-dimenziós belső szerkezetéről képet kapjunk. A CT felvételeken a vizsgált elem szeletekre bontva elemezhető, melyen a szeletek sűrűségi megoszlása figyelhető meg. A sűrűségképen kirajzolódnak az elem sajátosságai, így olyan elváltozásokat is meg lehet figyelni, melyre más módszerekkel nincs lehetőség. Mivel a vasbeton valójában nem homogén anyag, így abban a különböző sűrűségű részek értelmezésével meghatározhatók a pórusok, az adalékszemek, az acélbetétek. A betonon belül lehetőség van még a kevésbé tömör részek egyszerű detektálására is.

A CT a hagyományos röntgen-átvilágítási technika továbbfejlesztése. A számítógépes tomográfiánál is röntgensugárzást használnak a felvételek elkészítéséhez,

de a sugarak nem filmet exponálnak, hanem detektorok segítségével érzékelik a röntgensugarakat, majd a detektorokból nyert villamos jelekből számítógép segítségével készül el a rekonstruált keresztmetszeti kép [Majorosné Lublőy, 2011].

A CT vizsgálat az eltérő anyagok eltérő sugárgyengítő tulajdonságán alapszik. A számítógépes tomográfia egy adott térfogatelem átlagos sugárgyengítését mutatja. A detektorok jelét a kép rekonstrukció során mátrixba rendezi. A mátrix egy-egy pontja megfelel a kép egy-egy pontjának, az értéke pedig az adott térfogategység sugárgyengítésével arányos. Ebből a számítógép meghatározza az egyes térfogatelemek relatív lineáris sugárgyengítését, melyet ezt követően egy skálához rendel. Az értékeket Hounsfield egységben adja meg. (A víz Hounsfield értéke, $HU=0$, míg a levegő értéke $HU=-1000$.) A beton alkotóelemeinek Hounsfield értékeit az 3.2. táblázat tartalmazza.

3.2. táblázat: Beton alkotóelemeinek Hounsfield értékei [Kocur, Saegner, Vogel, 2010]

	HU [-]
Levegő	(-1024)-745
Cementkő	745-1480
Adalékanyag	1480 - 3071

A vizsgálat legfőbb hátránya, hogy jelenleg a betonszerkezetek számítógépes tomográfiával való vizsgálatához a szerkezetből mintát kell venni, hiszen a gép nagy mérete miatt nem lehet helyszíni vizsgálatához használni (3.7. ábra).



3.7. ábra CT készülék feltöltéses vizsgálat közben [Lublőy, 2012]

Ennek megfelelően két olyan csődarab lett kivágva, melyeken jól megfigyelhető rozsdafoltok voltak. Ezekről készítettünk CT felvételt, melyet utána kielemeztünk.

3.3. Sentab csövek állapotromlásának elemzése a vizsgálati eredmények alapján

3.3.1. Betonkorrozio lehetőségének vizsgálata Sentab csövek esetén

Szemrevételezés alapján a cső felülete általános esetben egyenletes volt. Nem tapasztaltunk duzzadásos betonkorrozóra, oldódásos betonkorrozóra, illetve fagyásra utaló jeleket. A cső belső felületét szemrevételezve, nem tapasztaltuk a cső kopásos betonkorrozóját sem.

Schmidt-kalapácsos vizsgálattal ellenőriztük a betonszilárdság egyenletességét. Két, általunk 2013 nyarán vizsgált csőelem mérési eredményei láthatók az *M.4. mellékletben*. A vizsgálati eredmények alapján a beton szilárdsága kielégítően egyenletes volt.

Az üzemen kívüli, kiszedett csőelemek esetén, több helyen megbontottuk a betonfedést, és fenolftalein oldattal megvizsgáltuk a beton pH értékét.

A megvizsgált csöveken általános részen csak a felülettől mért néhány tized mm mélységig csökkent a pH érték 9 alá. (A fenolftalein oldattal való vizsgálataink eredményét részletesen a karbonátosodás okozta acélkorroziónál tárgyalom.)

A csövekből több helyen furatpor mintát vettünk, melynek laboratóriumban meghatároztuk a pH értékét. *(Két csőből vett furatpor minták vizsgálati eredményei láthatók az M.5. mellékletben. A furatpor minták jelölésének magyarázata a 3.3.2.2. fejezetben, a kloridion okozta acélkorrozio tárgyalása alatt található.)* A vizsgálati eredmények alapján a minták pH értéke 12,0-12,4 között változott. Kivéve az egyik zsaluillesztés környezetében tapasztalt rozsdafoltnál, ahol 11,7; illetve 11,9 volt a mért pH érték.

A vizsgálati eredményeink alapján a Sentab típusú feszített vasbeton nyomócsövek esetén betonkorrozóra utaló jeleket egyik vizsgált csőelem esetén sem tapasztaltuk.

3.3.2. Acélkorrozio vizsgálata Sentab csövek esetén

A Sentab típusú csövek szemrevételezése során acélkorrozóra utaló nyomokat tapasztaltunk a cső felületén. A szemrevételezés során tapasztalt rozsdafoltokat az *M.3. mellékletben*, elhelyezkedésük alapján, csoportosítva foglaltam össze.

Felmerül a kérdés, hogy a tapasztalt acélkorrozio a karbonátosodás okozta depassziválódásra, vagy a kloridion jelenlétére vezethető vissza.

A tapasztalt rozsdafoltok okának meghatározásához elvégeztük a rozsdafoltok környezetének feltárását. A feltárás közben többször megvizsgáltuk a frissen tört felületet fenolftalein oldattal, illetve a csövekből furatpor mintát vettünk a rozsdafoltok környezetében, illetve a cső jó állapotú részein, majd azon laboratóriumban pH, illetve kloridion-tartalom meghatározást végeztünk. A feltárások során igyekeztünk felderíteni annak okát, hogy miért pont azon a részen alakult ki az acélbetét korrozója.

3.3.2.1. Karbonátosodás okozta acélkorrózió

A karbonátosodási mélységet több helyen megvizsgáltuk fenolftalein oldattal a kiszedett csöveknél. Ahogy a 3.8. ábrán látható, a karbonátosodási mélység – azokon a helyeken, ahol nem tapasztaltunk korróziót – a cső felületétől mért néhány tized mm volt.

A csövekből vett furatpor minták pH értékét laboratóriumban meghatároztuk. (Két csőből vett furatpor minták vizsgálati eredményei láthatók az M.5. mellékletben). A vizsgálati eredmények alapján a minták pH értéke 12,0-12,4 között volt. Kivéve az egyik zsaluillesztés környezetében tapasztalt rozsdafoltnál, ahol 11,7; illetve 11,9 volt a mért pH érték. Ez alapján kijelenthető, hogy egyik furatpor minta esetén sem volt jelentős mértékű a karbonátosodás.



3.8. ábra: Karbonátosodás vizsgálata fenolftalein oldattal a cső általános részén (Bal oldali kép készült: 2012. 07. 16., jobb oldali kép készült: 2012. 08. 06.)

A rozsdafoltok többségének környezetében ugyancsak néhány tized mm volt a karbonátosodási mélység (3.9. ábra) fenolftalein oldattal való vizsgálat alapján. Tehát ezekben az esetekben, az acélbetétek környezetében a pH érték > 9 -nél nagyobb volt, így nem okozhatta a karbonátosodás miatti depassziváció azokon a részeken a feszítőbetétek korrózióját.



3.9. ábra: Karbonátosodás vizsgálata fenolftalein oldattal rozsdafoltok környezetében (Bal oldali kép készült: 2010. 11. 04., jobb oldali kép készült: 2013. 07. 22.)

Míg két, általunk vizsgált rozsdafoltnál a karbonátosodási front elérte a feszítőbetéteket, így a karbonátosodás miatt is bekövetkezhetett a feszítőbetét korróziója.

Az *M.3. mellékletben* ismertetett, *M.18. ábrán* látható hosszanti rozsdafolt környezetét feltárva megfigyeltük, hogy az acélbetét nem lett a spirálhuzal-rendező lécebe befűzve (*M.26. ábra*), így ott a betonfedés jelentősen (12 mm helyett 3,51 mm volt) lecsökkent, és a beton is porózus volt. Ezen a részen a fenolftalein oldat nem színeződött el, tehát a pH érték 9 alá csökkent (*3.10. ábra*).



3.10. ábra: Karbonátosodási front elérte a feszítőhuzalt (Kép készült: 2013. 07. 22.)

Az *M.21. ábrán* ismertetett repedés környezetét feltárva azt tapasztaltuk, hogy a repedés a feszítőbetétekig tartott. A repedés felülete fenolftalein oldat felhordása után nem színeződött el, tehát a repedés felületénél a beton pH értéke 9 alá csökkent (*3.11. ábra*). (Ez érthető a 2.8. fejezetben ismertetettek alapján, hiszen a repedés felülete karbonátosodni tudott a repedésen keresztül CO_2 tartalom miatt.) Ez azonban azt jelenti, hogy az acélbetét ezen a részen depassziválódott. Tehát itt okozhatta a feszítőbetét korrózióját a karbonátosodás.



3.11. ábra: Repedés felülete nem színeződött el a fenolftalein oldat felhordása után (Kép készült: 2013. 07. 18.)

Ezek alapján kijelenthető, hogy a beton kellően tömör volt ahhoz, hogy általános esetben a karbonátosodási mélység ne érhesse el a feszítőbetéteket. Csak olyan esetben következett be karbonátosodás miatti acélkorrózió, amikor a betonfedés a tervezetthez képest jelentősen lecsökkent és a betonfelület porózussá vált, illetve amikor a feszítőbetétekig terjedő repedés volt a cső felületén.

3.3.2.2. Kloridion-tartalom okozta acélkorrózió

Az üzemén kívüli csövekből furatpor mintát vettünk a kloridion-tartalom mennyiségi meghatározásához.

Két cső esetén ismertetem a vizsgálati eredményeket. (A két cső egymástól néhány tíz méter távolságra helyezkedett el beépített állapotban. A szemrevételezés alapján jelentősen eltért a két cső állapota. Gyártásuk között nagyjából egy év különbség volt. A szemrevételezés alapján rosszabb állapotú, korábban gyártott csövet **I. számú csőnek** nevezem, míg a később gyártott, jobb állapotú csövet **II. számú csőnek**.)

A mintavételi helyeket az *M.11. ábrán*, illetve az *M.12. ábrán* adtam meg. A mérési eredményeket az *M.5. táblázatban* és az *M.6. táblázatban* adtam meg. (A táblázatban feltüntetett vizsgálati eredményeknél a betű jelöli a mintavétel helyét, míg a „per” jel utáni szám a mintavétel mélységét jelenti.)

A csövek külső felületén levő mintavételi helyeken két mélységből vettünk furatpor mintát. Az 1. számú mintát 0-8 mm mélységből, a 2. számú mintát 8-20 mm mélységből vettük a felülettől mérve. (Abban az esetben, ha a mintavétel közben a fúrószár elérte a feszítőhuzalt, akkor addig a mélységig (hőzzávetőlegesen 15 mm-ig) történt a mintavétel. Ez a vizsgálat szempontjából elhanyagolható hibát jelent, hiszen a fő kérdés az, hogy az acélbetétek mélységében milyen kloridion-tartalom van.)

A vizsgálatokhoz szükséges furatpor minta biztosítása végett egy vizsgálati helyen 4 furatot készítettünk, melyeket egybe gyűjtöttünk (*3.12. ábra*). Ezzel csökkenteni tudtam a mintavételezés hibáit (pl.: nagyobb adalékanyag-szemcsékből vett minta, stb. kockázatát) is.



3.12. ábra: I. számú cső 3. oldalánál (beépítés szerinti alján) vett N és O jelű mintavételi helyek (Kép készült: 2013. 07. 18.)

Az I. számú csövön (*M.11. ábra*) a cső belseje felől (1/b vizsgálati helyen) is vettünk furatpor mintát, annak kizárására, hogy a kloridion az ivóvízből származna.

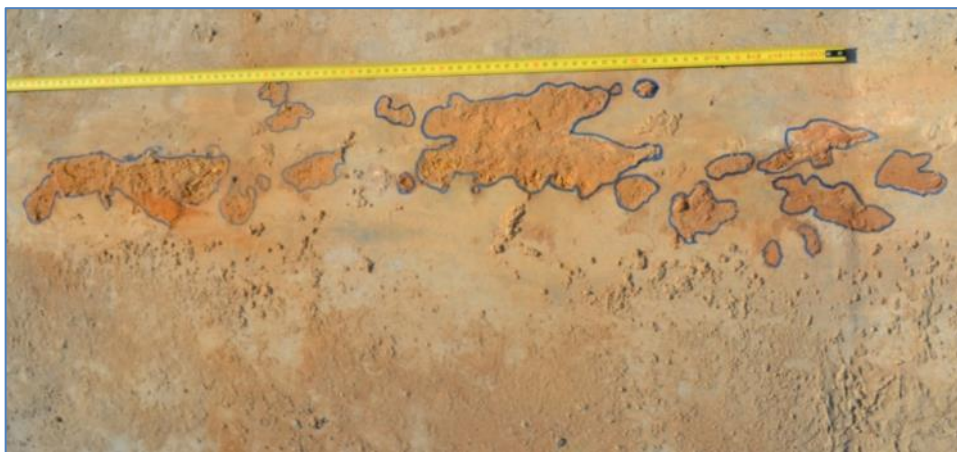
Az 1/b helyen négy mélységből vettünk mintát. Az 1. számú mintát a belső felülettől számított 0-15 mm mélység tartományból, a 2. számú mintát 15-30 mm

mélység tartományból, a 3. számú mintát 30-45 mm mélység tartományból, míg a 4. számú mintát 45-70 mm mélység tartományból vettük.

Az M.5. táblázatban és az M.6. táblázatban „**vastag**” betűvel kiemeltem azokat az értékeket, ahol a feszítőbetét környezetében (az MSZ 4798-1:2004 szabvány által feszített acélbetétet tartalmazó betonok, nedves környezetben) megengedett, cement tömegére vonatkoztatott 0,1 m% legnagyobb kloridion-tartalmat megközelítette, illetve meghaladta a minta kloridion-tartalma.

A mérési eredmények alapján az I. számú csőben (M.5. táblázat) a kloridion-tartalom az E, F, G, H, I, J, K, M, O, V helyeken elérte, illetve meghaladta a feszítőbetéteknél megengedett határértéket. A vizsgálati eredményekből látható, hogy a rozsdafoltok környezetében (E, G, K) magasabb kloridion-tartalom volt. Emellett a karbonátosodási mélység nem érte el a feszítőbetéteket. Ezek alapján feltehetően ezeken a helyeken a feszítőhuzal korróziója a magas kloridion-tartalom hatására következhetett be.

Az I. számú csővön észleltünk egy nagy (M.11. ábra 3. számú) rozsdafoltot (3.13. ábra), melynek környezetében vettük az L jelű mintát, melyben a többi rozsdafoltnál mért értékhez képest kisebb kloridion-tartalom volt. A nagy rozsdafolt (M.15. ábra) területén vett (V jelű) mintában kimagaslóan nagy kloridion-tartalmat – a megengedett határérték 21-szeresét, azaz a cement tömegére vonatkoztatva 2,10 m% kloridion-tartalmat – mutatott ki a laboratóriumi elemzés. Emellett a karbonátosodási mélység nem érte el a feszítőbetéteket, így nagy biztonsággal kijelenthető, hogy a zsaluillesztésnél észlelt rozsdafolt alatt a feszítőbetétek korróziója elsősorban a nagy kloridion-tartalom miatt következett be. (A rozsdafolt környezetéből vett L minta és a rozsdafoltnál vett V minta nagyon eltérő kloridion-tartalmának valószínűsíthető okával a 3.3.3. fejezetben foglalkozom.)



3.13. ábra: I. számú cső zsaluillesztésénél észlelt hibahely (Kép készült: 2013. 07. 18.)

Az I. számú cső beépítési állapotának megfelelő jobb oldalán, bal oldalán és a tetején mértünk magasabb kloridion-tartalmat, a cső alján nem. Feltehetően a kloridion-tartalom az utak sózása miatt emelkedett meg.

Az I. számú cső belső felülete felől vett furatpor mintákban mind a négy mélységben a megengedett határérték alatt volt a kloridion-tartalom. Míg a külső felületről vett furatpor minták kloridion-tartalma több helyen meghaladta a szabvány által megadott határértéket. Ez alapján arra következtetünk, hogy a feszítőbetétek korrózióját okozó kloridion a cső külső oldala felől jutott be a betonba.

A II. számú csőből vett minták kloridion-tartalma sehol sem érte le a 0,1 m% kloridion-tartalmat a cement tömegére vonatkoztatva (M.6. táblázat).

Az I. számú cső és a II. számú cső egymáshoz közel volt beépítve. Az I. számú cső gyártási éve 1973, míg a II. számú csőé 1974 volt, mégis a két cső állapota jelentősen különbözött. Erre magyarázat lehet az eltérő kloridion-tartalmuk. *(A 3.3.3. fejezetben ismertetem annak valószínűsíthető okát, hogy miért volt ennyire eltérő a két cső állapota, illetve a két cső kloridion-tartalma.)*

Az M.5. táblázat és az M.6. táblázat tanulmányozásakor megfigyelhető, hogy egyes mérési helyeken a mélyebb rétegben nagyobb kloridion-tartalom volt, mint a beton felületéhez közel. Ez feltehetően azzal magyarázható, hogy a talajban levő, illetve a felszínről lejutó víz kimosta a felső rétegből a kloridiont. Mivel a talaj nem tekinthető homogén közegnek, így elképzelhető, hogy egyes részeken megtörtént ez a kimosódás, míg más részeken a feltételek nem voltak adottak hozzá.

3.3.3. Sentab csövek állapotromlásának elemzése

A Sentab csövek állapotvizsgálata alapján azt tapasztaltuk, hogy a csövek betonszilárdsága viszonylag egyenletesnek mondható a Schmidt-kalapácsos mérések alapján.

Betonkorrózióra utaló jeleket nem tapasztaltunk az általunk vizsgált 8 üzem alatti és 10 üzemén kívüli cső esetén. Azonban a csövek felületén több rozsdafoltot észleltünk, melyek a feszítőbetétek korróziójára utalnak. Az üzemén kívüli csövek esetén meghatároztuk a rozsdafoltok környezetében a karbonátosodási mélységet, illetve a kloridion-tartalmat.

Az eredményeink alapján két olyan rozsdafolt volt, ahol a lecsökkent betonfedés, a porózus beton, illetve repedés miatt a karbonátosodási mélység elérte a feszítőbetéteket, így annak korrózióját okozhatta.

A többi rozsdafolt környezetében a karbonátosodási mélység nem érte el a feszítőbetéteket, míg a környezetükből vett furatpor minták kloridion-tartalma meghaladta a vonatkozó szabvány által megengedett határértéket.

3.3.3.1. Feltárások eredményének elemzése

A rozsdafoltok környezetét feltártuk, hogy meghatározzuk a hibák valószínűsíthető okát. A feltárás eredményeit az M.6. mellékletben ismertetem.

A feltárások alapján azt tapasztaltuk, hogy a бүтүс felületen jelentkező rozsdafoltoknál a hosszanti feszítőhuzalok végei korrodálódni kezdtek, melyhez a kis

betonfedés jelentősen hozzájárulhatott. Valamint a feltárásnál azt tapasztaltuk, hogy a spirális feszítőhuzal is korrodálódott, melynek nyoma nem jelentkezett a cső palástján. A spirális feszítőhuzal környezetében nem karbonátosodott még a beton, így feltehetően a бүтүс felület környezetében tapasztalt korróziónak a kloridion, illetve a kis betonfedés lehetett az oka.

Az I. számú cső zsaluillesztésének környezetében levő rozsdafolt feltárásnál, a betonfelület alatt hozzávetőlegesen 1 cm-rel megtaláltuk a tömítő szalagot. Ez alapján felmerült a kérdés, hogy a cementpép egy része kifolyhatott gyártás közben a zsaluillesztésnél, így porózusabb lehetett ezen a részen a beton.

Ennek megfelelően mintát vettünk a zsaluillesztés környezetében levő betonfedésből, illetve egy ép, tömörnek látszó betonfelületből. Laboratóriumban meghatároztuk az adott minták vízfelvételét, testsűrűségét, illetve látszólagos porozitását (3.3. táblázat). Az eredményekből látható, hogy a cső belsejében volt a legnagyobb a beton sűrűsége, illetve legkisebb látszólagos porozitása. Ez feltehetően a vibrohidropreseléses gyártástechnológiával magyarázható, hiszen a belső zsaluzat kitágulásával járó tömörítő hatás jobban érvényesülhet a spirálisan futó feszítőhuzalon belüli részen, mint a spirális huzalon kívüli betonon. (A spirális feszítőhuzal átmérője az általunk vizsgált csövek esetén 5 mm volt, míg a huzal egymás melletti két menete közti távolság 15 mm. A csövek külső oldalán a tervezett minimális betonfedés 12 mm volt. Így feltehetően a spirális feszítőhuzal külső oldalán levő betonra kisebb hatással volt a vibrohidropreseléses tömörítési technológia.)

Továbbá az eredményekből látható, hogy a zsaluillesztések környezetében a betonfedés látszólagos porozitása sokkal nagyobb volt, mint az ép betonfedésnél, míg a testsűrűsége kisebb. Ez alátámasztja a feltáráskor tapasztaltakat, miszerint a zsaluillesztéseknél a tömítőszalag elmozdulása miatt a cementpép egy része kifolyhatott a zsaluzatból, így porózusabbá vált a beton. Véleményünk szerint ezzel magyarázható a zsaluillesztések környezetében tapasztalt gyakori korróziós probléma.

3.3. táblázat: Sentab csövek különböző részeiről vett mintáinak vízfelvétele, testsűrűsége és látszólagos porozitása

Mintavétel helye	Vízfelvétel [m%]	Testsűrűség [kg/m ³]	Látszólagos porozitás [V%]
zsaluillesztésnél, betonfedésből	3,77	2341	8,83
ép felületen, betonfedésből	1,97	2403	4,74
ép részen, cső belsejéből	1,43	2449	3,50

Feltehetően az I. számú cső L és V mintavételi helyeiből vett furatpor minták kloridion-tartalmában tapasztalt jelentős eltérés is azzal magyarázható, hogy a zsaluillesztések környezetében levő porózusabb betonon keresztül könnyebben bejuthatott a kloridion a feszítőbetétekig. Míg a zsaluillesztéstől kicsit távolabb (L mintavételi helynél) már tömörebb lehetett a betonfedés, így ott kisebb mértékben juthatott be a kloridion.

Az I. számú cső zsaluillesztésének vonalában (ahol a rozsdafoltot tapasztaltuk), az egész alkotó mentén (5195 mm) eltávolítottuk a betonfedést és meghatároztuk a spirális feszítőhuzal betonfedését, illetve az egyes helyeken tapasztalható károsodást. Ezt egy grafikonon ábrázoltam (*M.29. ábra*). A grafikon alapján látható, hogy az észlelt rozsdafolt környezetében a betonfedés lecsökkent.

Ezek alapján úgy gondolom, hogy a zsaluillesztések környezetében azért jelentkeznek gyakran korróziós problémák, mert ezeken a részeken a gyártási hibák miatt porózusabb lehetett a beton, illetve a Sentab csövek esetén több esetben is azt tapasztaltuk, hogy nehezen tartották az előírt betonfedést (*M.29. ábra, M.30. ábra*).

A cső palástján, a cső бүтүс felületéhez közel több esetben is tapasztaltunk rozsdafoltot, melynek feltárása során azt tapasztaltuk, hogy a spirálisan futó feszítőhuzal véglehorgonyzó eleme kezdett el rozsdásodni. A feltárás tapasztalata alapján a cső бүтүс felületéhez közelebbi oldala jobban korrodálódott. Fenolftalein oldatos vizsgálat alapján a karbonátosodási front még nem jutott el a lehorgonyzó elemig. Ezek alapján arra következtetünk, hogy a cső бүтүс oldala felől érkező kloridion okozhatta az általunk vizsgált lehorgonyzó elemek korrózióját.

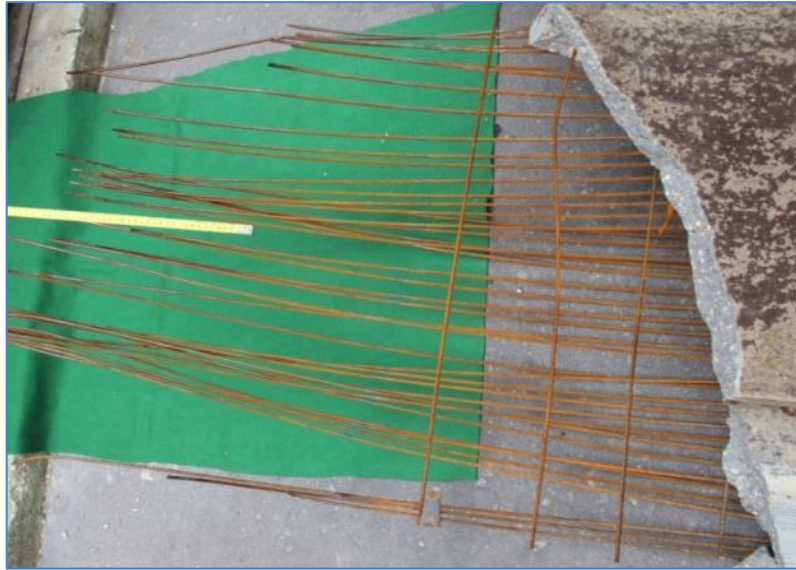
Az általunk vizsgált csövek esetén több olyan rozsdafoltot észleltünk a csövek palástján, melyeknél a rozsdafoltban nagyméretű pórust, illetve pórusokat figyeltünk meg (*M.19. ábra, M.20. ábra*).

Az *M.19. ábrán* tapasztalt rozsdafolt feltárásánál azt tapasztaltuk, hogy a rozsdafolt alatt az egyik helyen a spirális feszítőhuzal teljes keresztmetszetében megszűnt, míg a mellette levő meneteknél mindössze 15%, illetve 20%-ban fogyott el a feszítőhuzal (*M.27. ábra*). Feltehetően az *M.19. ábrán* látható jelentős méretű pórusokon keresztül a kloridion, illetve a víz és oxigén bejutott a feszítőhuzalig, és így annak lokális korrózióját okozta.

A vizsgálati eredmények alapján egyértelműen látható, hogy a gyártási hibáknál sokkal érzékenyebb a cső a környezeti hatásokra, mint a tömör részeken.

3.3.3.2. Feszítőbetétek vizsgálatának elemzése

Ezt követően megvizsgáltuk a bevezetőben is említett, héjkitöréssel tönkrement csőelem esetén az elszakadt spirális feszítőhuzalt. Azt tapasztaltuk, hogy a cső tönkremeneteléhez meglepően sok, 43 helyen szakadt el a spirálisan futó feszítőhuzal (*3.14. ábra*). A spirálisan futó feszítőhuzalon lyukkorrózió jeleit figyeltük meg.



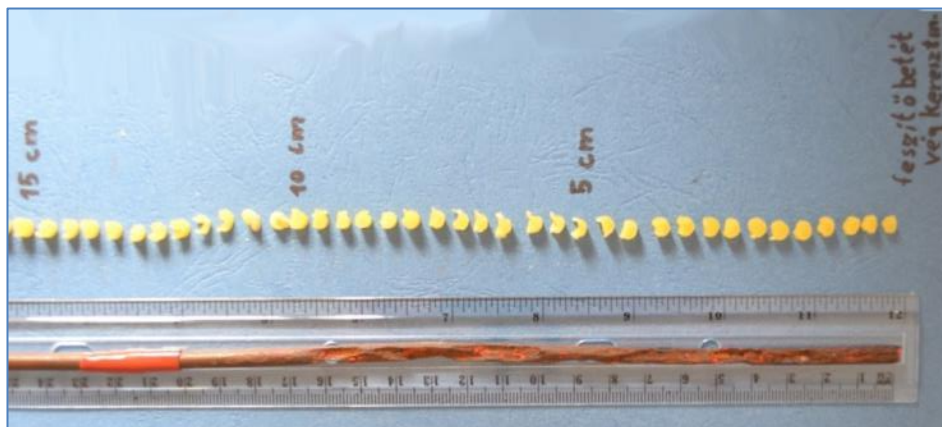
3.14. ábra: Spirálisan futó feszítőbetétek elszakadása (Kép készült: 2012. 07. 06.)

A tönkrement spirálisan futó feszítőbetétet egyik részét 1cm-es darabokra vágtuk, így jobban megfigyelhető a feszítőhuzal közepén kialakult lyuk jellege (3.15. ábra).



3.15. ábra: Feszítőhuzal 1cm-es darabjai (Kép készült: 2012. 07. 25.)

A spirálisan futó feszítőbetét egy részéről elkészítettük a viasz mását, melyet utána apró szeletekre vágunk, hogy meg lehessen vizsgálni a keresztmetszet változását a feszítőhuzal hossz tengelye mentén (3.16. ábra).

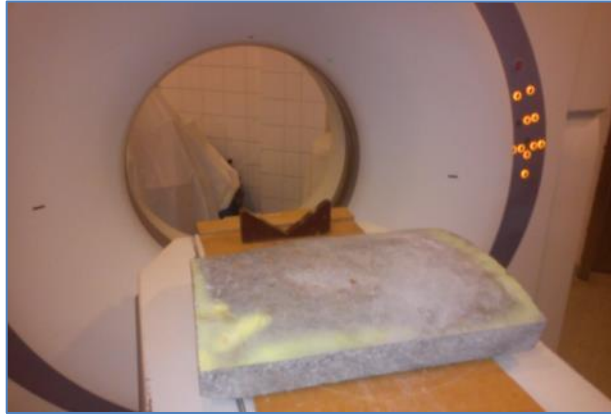


3.16. ábra: Spirálisan futó feszítőbetét viasz másának keresztmetszet vizsgálata (Kép készült: 2012. 07. 25.)

A héjkitöréssel tönkrement cső vizsgálatából arra lehet következtetni, hogy jelentős biztonsági tartalékkal készültek a Sentab csövek. Ahhoz hogy egy robbanásszerű tönkremenetel bekövetkezzon, nem elegendő, ha 1-2 helyen megszűnik a

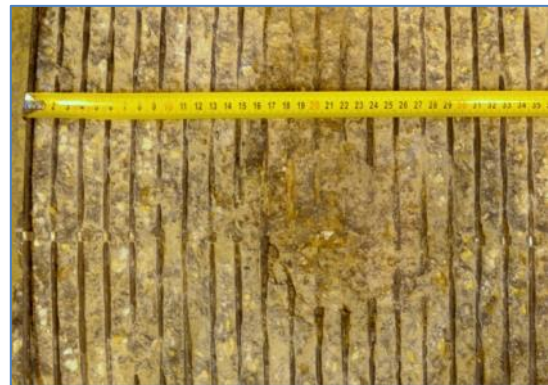
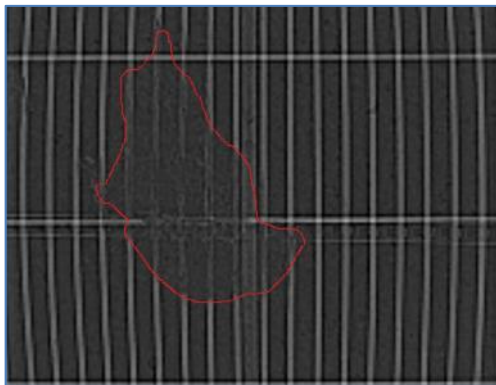
spirálisan futó feszítőbetét keresztmetszete. Fontos azonban tisztában lenni azzal is, hogy egy esetleges tönkremenetel mekkora károkat okoz, így azt mindenképpen el kell kerülni.

Két üzemen kívüli csőből kivágtak olyan részeket, melyen jelentős kiterjedésű rozsdafolt látszott (3.17. ábra). A CT felvételen jól látható, hogy a rozsdafolt alatt a spirálisan futó feszítőhuzal 8 meneténél megszűnt a teljes feszítőhuzal keresztmetszet.



3.17. ábra: Kivágott csődarab CT vizsgálata (Képet készítette: Földes Tamás)

A CT vizsgálatot követően a betonfedés eltávolításával ellenőriztük a CT felvételeken tapasztaltakat (3.18. ábra). Feltáráskor a felvételnek megfelelő állapotban találtuk a feszítőbetéteket.

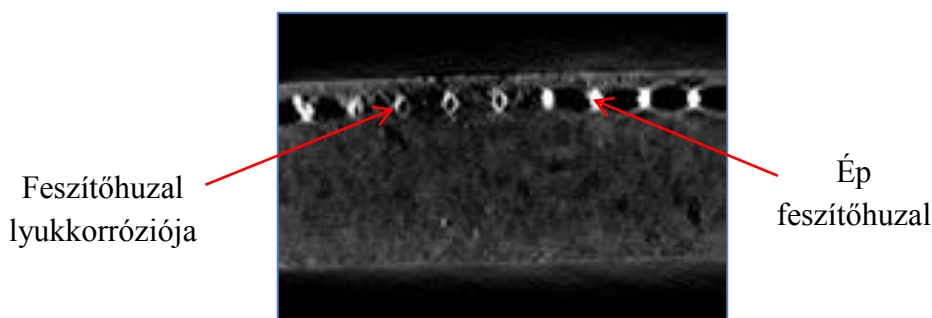


3.18. ábra: Vizsgált minta CT modellje és betonfedés eltávolítását követő képe (CT modellt készítette: Földes Tamás, betonfedés eltávolítását az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában végeztük: 2012. 11. 23-án)

A CT felvételek vizsgálatakor megfigyelhető a spirálisan futó feszítőhuzal lyukkorróziója is (3.19. ábrán).

Ezek alapján azt lehet mondani, hogy a CT felvételekkel jól lehet vizsgálni a károsodott Sentab csövek állapotát. Nagy előnye a módszernek, hogy láthatók az egyes részek sűrűségei, mellyel ki lehet mutatni a nagyobb pórusokat, kapillárisokat, illetve a beton sűrűségváltozásait is. Ezzel az eljárással ki lehetne mutatni, hogy például az M.19. ábrán, illetve az M.20. ábrán bemutatott nagyméretű pórusok ténylegesen leérnek-e a feszítőbetétekig, vagy sem. Úgy gondolom, hogy a csövek leromlási

folyamatának elemzésénél nagy segítséget jelentene, ha a rozsdafoltok kialakulásának vizsgálatánál a feltárásokat CT vizsgálat tudná megelőzni, mert ezek eredménye kiegészíthetné, alátámaszthatná a vizsgálatokból nyert eredményeket.



3.19. ábra: Spirálisan futó feszítőbetét lyukkorróziója a CT felvételen (CT felvételt készítette: Földes Tamás)

3.3.3.3. Csövek eltérő állapotának elemzése

A korábbiakban többször tárgyalt I. számú cső és II. számú cső állapota jelentősen eltért, annak ellenére, hogy egymástól néhány tíz méterre voltak beépítve. Az I. számú csőben sokkal nagyobb kloridion-tartalom volt, mint a II. számú csőben. Mivel a két csövet eltérő évben gyártották, felmerült a kérdés, hogy a környezeti hatásokban volt-e csak eltérés, vagy esetleg a betonösszetételben is. A kérdés megválaszolásához szükségesnek láttuk a csövek anyagának elemzését.

Mindkét csőből, a cső beépítés felőli felső oldaláról vett furatpor mintákon (I. számú cső F/2 minta, és II. számú cső K/2 minta) készítettünk fázisanalitikai elemzéseket (M.8. melléklet).

A röntgendiffraktogramok hasonló eredményeket adtak (M.31. ábra). A kisebb eltérések magyarázhatók azzal, hogy a két cső gyártása közben eltelt közel 1 év alatt a gyártáshoz felhasznált anyagok összetétele kis mértékben megváltozhatott.

Az I/F/2 mintavételi helyen (a rosszabb állapotú csövön) a vashidroxid kimutathatósága azt jelenti, hogy a mintában az acélbetét korróziós terméke jelen volt.

A derivatogramok alapján látható (M.8.2. melléklet), hogy a portlandit és a kalcium-karbonát mennyisége kismértékben eltért a két mintában. Mindkét betoncsőre megállapíthatjuk, hogy a cementkőben van még portlandit, de ennek a hidrátterméknek, valamint a karbonátosodás során a belőle képződő kalcit mennyisége is eltért. (A rosszabb állapotú I. számú csőben több volt a kalcit.)

A II/K/2 mintában monoszulfát jelenlétét is kimutattuk. Ebből arra következtetünk, hogy a csövek gyártása, illetve tárolása között kismértékű eltérés lehetett, azonban ennek mértéke nem magyarázza önmagában a két cső jelentősen eltérő állapotát.

Az I. számú, illetve a II. számú csövekről azt a tájékoztatást kaptam a hálózatot üzemeltető cég képviselőjétől, hogy az egyik cső aszfalt burkolat alatt volt, melyet

rendszeresen síkosság mentesítettek, míg a másik egy park füves területe alatt, ahol nem sózták a területet. A vizsgálati eredményekből arra következtettek, hogy az I. számú cső volt az úttest alatt, míg a II. számú cső a füves terület alatt, mely magyarázhatja az eltérő kloridion-tartalmukat.

Véleményünk szerint a csövek állapotában tapasztalt jelentős különbséget elsősorban a környezeti hatások eltérő mértéke okozhatta és nem az eltérő betonösszetétel.

3.3.3.4. Sentab csövek elemzésének összefoglalása

Az eddigi vizsgálatok alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a csöveken keletkezett hibahelyek legtöbbször ott alakultak ki, ahol a betonfedés lecsökkent, illetve ahol a beton porózusabb volt, mely feltehetően a gyártáshibákra vezethető vissza.

Találkoztunk olyan gyártási hibával is, mely nem vezetett a feszítőbetétek korróziójához. Más esetben viszont látszólag azonos gyártáshiba már elégséges volt ahhoz, hogy beindítsa a szemmel látható állapotromlást. A különbség a két esetben az eltérő környezeti hatás volt.

Sok esetben a betonba bejutó kloridion jelentősen felgyorsította a leromlási folyamatot. Az utak síkosság mentesítését leginkább nátrium-kloriddal (NaCl) végzik, illetve végeztek, mely után a hólével alapvetően a csapadékvíz csatornába folyik el az útfelületről. Az utak felszínéről nem a teljes olvadék kerül a csapadékcatorna hálózatba, hanem egy része a talajba szivárog, és ott eljuthat a Sentab csövekhez.

Megvizsgáltunk két olyan csövet, melyek állapota jelentősen eltért, annak ellenére, hogy néhány tíz méterre voltak beépítve egymástól. Az egyik cső gyakran síkosság mentesített úttest alatt volt, míg a másik füves terület alatt. Megállapítottuk, hogy noha a gyártási évük egy évvel eltért egymástól, a betonösszetételben nem volt jelentős különbség. A kloridion-tartalom meghatározásából egyértelműen látszik, hogy az úttest alól kivett cső sokkal nagyobb kloridion-tartalmú volt, mint a füves terület alól kivett cső.

Ezek alapján azt lehet mondani, hogy a Sentab csövek állapotromlása nagymértékben függ a csőelemet érő környezeti hatásoktól, illetve a cső gyártása, beépítése, illetve használata során keletkezett hibáktól (porózus betonfedés, lecsökkent betontakarás, repedés stb.)

Vizsgálati eredményeink arra engednek következtetni, hogy a csőelemeket érő környezeti hatások viszonylag rövid szakaszon belül is jelentősen eltérhetnek, így az ott végzett állapotvizsgálatok eredményében is jelentős eltérések lehetnek. Ennek megfelelően a feltárási helyek kiválasztását komoly utánajárásnak, tervezésnek kell megelőznie, hogy a vizsgált csőszakasz szempontjából releváns csőelemek kerüljenek feltárássra.

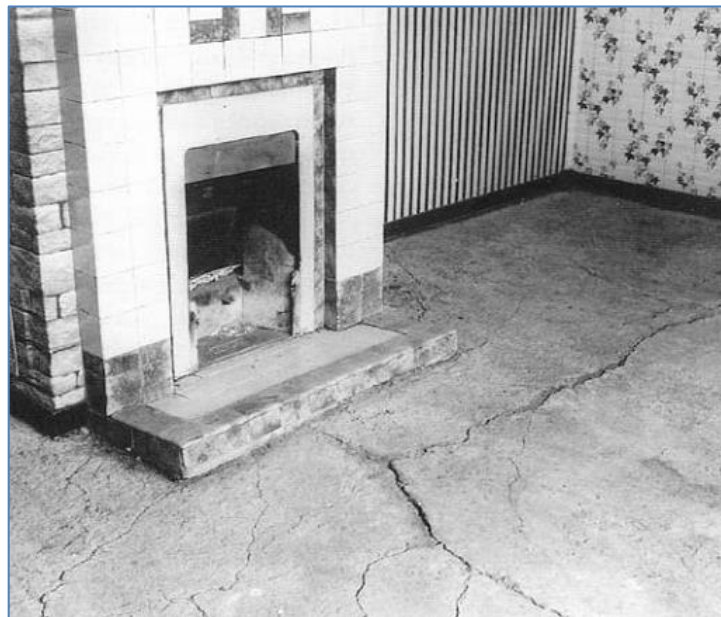
4. LEROMLÁSI FOLYAMATOK BEMUTATÁSA TOVÁBBI GYAKORLATI PÉLDÁKON

Előzőekben részletesen ismertettem saját vizsgálataim alapján a Sentab csöveknél tapasztalt leromlási folyamatokat, melyek az acélkorrózió miatt következtek be. Ebben a fejezetben a szakirodalmakban található gyakorlati példákon ismertetem a betonkorrózió egyes eseteit.

4.1. Szulfátos víz és gáz okozta betonkorrózió

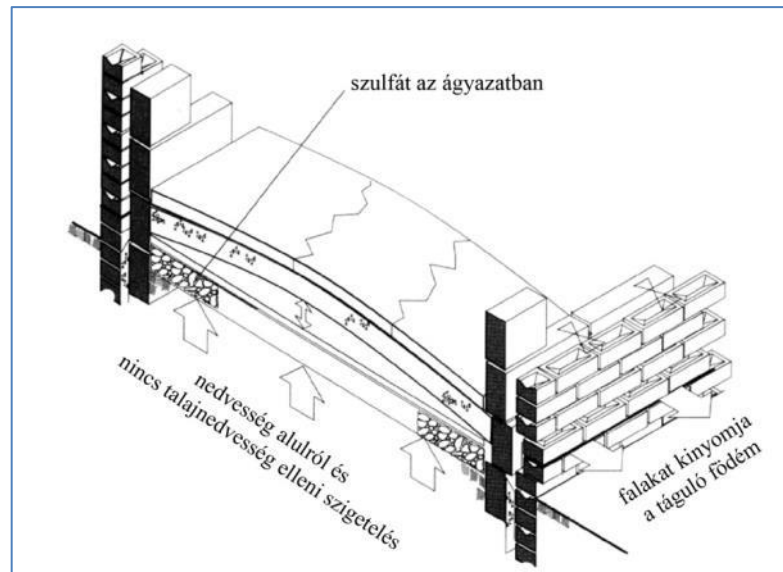
Longworth [2008] alapján 1945 és 1970 között több százezer angliai ingatlan építésénél használtak fel szulfát-tartalmú anyagot ágyazatként, mely szénbányák meddőjéből, vagy ipari melléktermékből származott. A kivitelezésnél nem használtak talajnedvesség elleni szigetelést az ágyazat és a vasbeton szerkezetek között, így a szulfát tartalmú ágyazat folyamatos problémát jelent ezeknél az ingatlanoknál, mert az ágyazatban levő szulfát megtámadja a fölötte levő ajszatbetont (vasbeton lemezt), illetve a velük határos falakat. A szulfát hatására a beton duzzadása, összeroppedezése következik be, ahogy az a 2.1. fejezetben is olvasható.

A 4.1. ábrán egy 1950-es években épült angliai ház padlójának szulfát okozta betonkorróziója látható. Ez egy tipikus példa ezeknél a házaknál jelentkező problémára.



4.1. ábra: 1950-es években épült angliai ház padlójának károsodása szulfát hatására [Longworth, 2008]

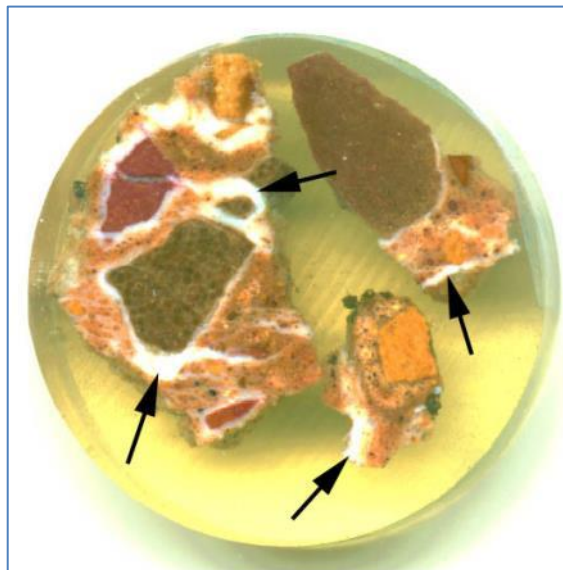
A 4.2. ábrán látható a szulfát tartalmú ágyazat okozta problémának a szematikus ábrája, melyen jól megfigyelhető, hogy a talajnedvesség, talajvíz a betonba juttatja a szulfátot, melynek hatására megduzzad. A duzzadás miatt a padló felpúposodik és összeroppedezik. A problémát súlyosbítja, hogy a beton duzzadása miatt a határoló szerkezetek (falak) is összeroppedeznek, így a teljes épület állékonyságát befolyásolhatja a szulfát okozta duzzadási betonkorrózió.



4.2. ábra: Ház padlójának és falainak károsodása szulfát okozta duzzadásos betonkorrózió miatt [Longworth, 2008]

Longworth [2008] szerint ezekben az esetekben lehetőség van a padló eltávolítását követően újjáépíteni a vasbeton lemezt, úgy hogy egy vízszigetelést építenek alá. Esetleg megfontolandó a padló elbontása után az egész ágyzatot is kicserélni, és ezt követően helyreállítani a vasbeton lemezt.

A szulfát okozta duzzadásos betonkorrózió nem csak lakóházaknál jelentkezhet. A 4.3. ábrán egy angliai autópálya betonjából készített vékonycsiszolat látható, melyen a mészkő adalékanyag (nagy sötét részek) körül kialakult taumazit (fehér részek) látható. A taumazit miatt a beton duzzadása következett be. Így a beton autópályán jelentős repedések alakultak ki.



4.3. ábra: Angliai autópálya betonjából vett vékonycsiszolat [understanding-cement.com]

4.2. Oldódásos betonkorrózió

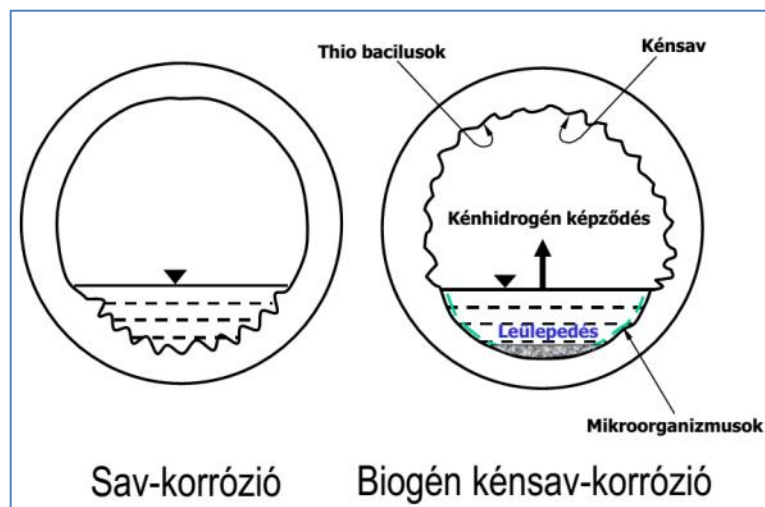
Sav okozta korrózió egyik leggyakoribb probléma a szennyvíz csatornában, illetve szennyvíztisztító műtárgyakban.

A savak hatására a beton vegyi bomlása következik be, ahogy az a 2.2. fejezetben olvasható. A szennyvízcsatornák betonját egyszerre több károsító hatás is érheti. A betont megtámadják a savak (pl.: biogén kénsav), miközben a szennyvízben levő szulfát is betonkorróziót okozhat, illetve a jégolvasztó sók is érik a szerkezetet, mely esetleg a betonacélok korróziójához vezethet. A 4.4. ábrán egy szennyvízakna beton bélésfalának károsodott felülete látható.



4.4. ábra: Szennyvízakna károsodott betonfelülete [Pethő, 2013]

Ahogy a 4.5. ábrán látható, a szennyvízcsövek károsodása nagymértékben függ a betont érő hatásoktól. Amennyiben a csatornában megfelelő viszonyokat tudnak biztosítani (kellő áramlási sebesség, nem alakul ki anaerob állapot), akkor a szennyvíz összetételétől függően nem következik be betonkorrózió, illetve egyes esetben a vízvonal alatt savkorrózió alakulhat ki. Amennyiben anaerob állapot alakul ki, a szennyvízcsőben biogén kénsav képződhet (lásd. 2.2. fejezet, illetve 2.6. fejezet). A biogén kénsav hatására a vízvonal felett is jelentős károsodást okozhat.



4.5. ábra: Szennyvízcsatorna oldódásos korróziójának megjelenési helyei sav-korrózió, illetve biogén kénsav-korrózió esetén [Pethő, 2013]

A korábban épült szennyvízkezelő műtárgyak esetén sokszor nem alkalmaztak megfelelő teljesítőképességű betonokat, melyek hosszú távon ellen tudtak volna állni az agresszív környezeti hatásoknak. Ezek javítása nehézkes, illetve költséges. Napjainkban törekednek tömör, nagy teljesítőképességű betonokkal, illetve különféle védőbevonatokkal biztosítani ezeknek a szerkezeteknek a tartósságát. Ezt példázza az elmúlt években átadott Budapesti Központi Szennyvíztisztító Telep is, melynek építéséhez a 4.6. ábrán látható követelményeket írták elő a betonhoz.

- C30/37-XV2(H)-XD2-XA2-32-F4
- Szilárdság (56 napos korban 15 cm-es kockán) 40 N/mm²
 - Vízáróság (56 napos korban XV2(H) körny. oszt esetén) 40 mm
 - Repedésmentesség
 - „Fehér kád” irányelv betartása
 - Max v/c = 0,5
 - Min. cementtartalom 320 kg/m³
 - Konzisztencia területtel mérve 1,5 óra után min. 450 ±30 mm (bedolgozásnál a tapasztalatok szerint a legjobb konzisztencia 500-550 mm)
 - Frissbeton 2 órás eltarthatóság.

4.6. ábra: BKSZT betonjára vonatkozó előírások [Lengyel, Sármay, Csíki, 2010]

4.3. Alkáli-adalék reakció

A következőkben a Kínában levő Daqing vasúti híd példáját ismertetem (4.7. ábra), melyet 1987-ben építették [inti.gob.ar]. A feszített, előregyártott vasbeton gerendákat Gaogezhungban (Észak-Pekingben) gyártották. Azon a környéken előfordulnak olyan adalékanyagok, melyek alkáli-adalék reakcióra hajlamosak.



4.7. ábra: Kínában levő Daqing vasúti híd [inti.gob.ar]

Néhány évvel később jelentkeztek a hídgerendákon a alkáli-adalék reakció miatti hálós repedések (4.8. ábra).

Az alkáli-adalék reakció hatására a beton összeropedezik (lásd. 2.3. fejezet), így a szilárdsága lecsökken. A repedések miatt a szerkezet állapota jelentős romlásnak indul. A rossz állapotú szerkezet karbantartási költsége pedig megnő. Ahogy Kausay könyvében [2013] olvasható: „Az ilyen betont javítani nem lehet”.



4.8. ábra: Kínában levő Daqing vasúti hídon tapasztalt repedések az alkáli-adalék reakció hatására [inti.gob.ar]

A gyakorlati tapasztalatok alapján látni kell, hogy a szerkezet építésétől számítva több évnek is el kell telnie az adalék-alkáli reakció betonfelületen való megjelenéséig (4.1. táblázat). Ezért fennáll a veszélye, hogy sok szerkezet elkészül az adalékanyagból, mire észlelik az alkáli-adalék reakcióra való hajlamát.

4.1. táblázat: Alkáli-adalék reakció észlelésének és a gyártásnak dátuma az egyes szerkezeteknél [inti.gob.ar]

Szerkezet	Építés éve	Alkáli-adalék reakció megjelenése	Eltelt idő a megjelenéséig
Shek Wu Hui Treatment Works	1980 - 1983	1991	9 - 12 év
Fan Ling Footbridges	1982	1998	16 év
North Point Govt. School	1987	about 1999	12 év
Hill Road Flyover	1982	1997	15 év

4.4. Fagy hatására bekövetkező betonkorrózió

A fagy hatásával kapcsolatban egy tanulságos gyakorlati példa található a „Beton- és vasbetonszerkezetek diagnosztikája” című könyv II. kötetében [Balázs - Tóth, 1998]:

Az M7 autópálya 13+100 km szelvénytől (Budapestre bevezető szakasztól) 30+600 km szelvényig (Martonvásárig) 1967-től van forgalom alatt, míg Martonvásártól Székesfehérvárig (56+400 km szelvényig) 1968-tól használják.

Mindkét szakasz burkolata 7,5 m széles beton volt, melyhez két oldalon 0,5-0,5 m széles optikai vezetősáv csatlakozott. Az optikai vezetősáv kétrétegű betonból készült, melynél a felső 6 cm-be fehér színű betont dolgoztak be.

A betonburkolat felülete már az átadást követő első év után több helyen sérült volt. Ezt követően a betonfelület hámlása, sarkainak leválása fokozódott (4.9. ábra).



4.9. ábra: M7 autópálya beton burkolatának hámlása [Balázs - Tóth, 1998]

A Közlekedés és Postaügyi Minisztérium 1970-ben elkészítette ennek a szakasznak a műszaki gazdasági vizsgálatait.

A szakvéleményhez több vizsgálatot elvégeztek, melyek alapján a beton egyenlőtlen szilárdságát, illetve nem megfelelő kopásállóságát emelték ki problémaként. A várható használati élettartambecsléshez dinamikus vizsgálatokat végeztek, melyek alapján a gyenge szilárdságú résznél 10-15 évet valószínűsítettek, míg a többi részen 40 éves forgalomhoz tartozó ismétlési számnak is megfelelt a beton.

A szakvéleményben nem említik a betonfelület hámlásának lehetséges okaként a fagy és jégolvasztó só okozta betonkorróziót, noha 1971. január 20-án a kiszórt csúszásgátló anyagból mintát vettek, melynél 9 mintából 4 esetén megállapították, hogy magas sótartalma volt.

Közel azonos időben megbíztak egy másik intézetet is a hiba okának megállapításával. A második szakvélemény derített fényt arra, hogy a betonfelület hámlását a fagy, illetve jégolvasztó só káros hatása okozhatja.

A második szakvélemény szerint kiderült, hogy az építési napló alapján a kis szilárdságú részt 1965 novemberében betonozták, amikor éjszaka már fagyott. A legalacsonyabb hőmérséklet (-17°C) november 25-én volt, de november 6-tól a napi hőmérséklet középértéke nem haladta meg a $+5^{\circ}\text{C}$ -t, így az ebben az időszakban betonozott útszakaszok éjszaka megfagytak, mely magyarázatul szolgálhat a kisebb szilárdságra.

Ez a gyakorlati példa a fagy okozta károsító hatás bemutatása mellett, felhívja a figyelmet arra is, hogy mennyire fontos egy szerkezet állapotromlásának vizsgálatakor tisztában lenni a lehetséges leromlási folyamatokkal, és azok vizsgálati lehetőségeivel, hogy helyes diagnózist tudjunk felállítani a szerkezet leromlási folyamataival kapcsolatban. Emellett rávilágít arra is, hogy mennyire fontos tanulmányozni a vizsgálandó szerkezet gyártásának körülményeit is, hiszen magyarázatot adhatnak a hiba okaira.

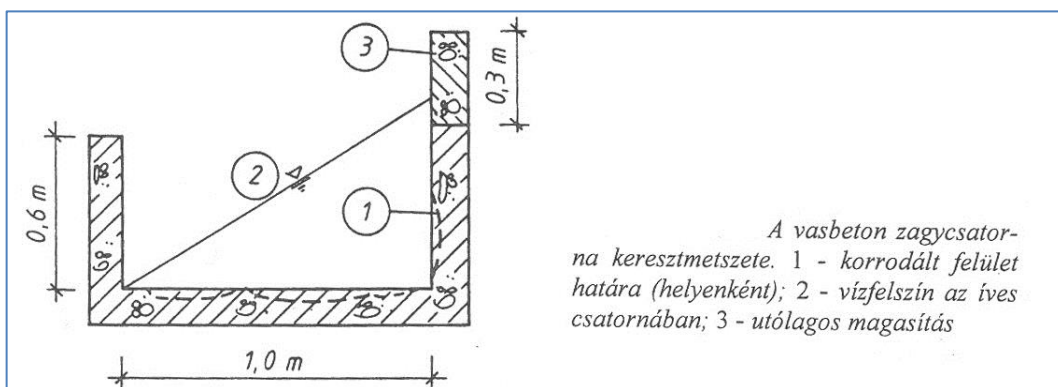
4.5. Koptatás hatására bekövetkező betonkorrózió

Sok példát lehet említeni koptatás hatására bekövetkező betonkorrózióra. Legtöbbször ipari padlók kapcsán merül fel a kopásálló beton fogalma. Azonban sok egyéb esetben is bekövetkezhethet a koptató hatás miatti erózió.

Egy ércdúsító üzem mellékterméke kvarchomok és víz keverékéből álló zagy volt, mely 280 kg/m^3 szilárdanyag tartalommal rendelkezett. Ennek az üzemnek a zagycsatornájában bekövetkezett koptatás miatti eróziójának példát ismerteti Balázs - Tóth [1998]:

A zagyot több km hosszú, kanyargós, vasbeton csatornában szállították. Az zagy üzemi sebessége 4-5 m/s volt, hogy a homok nehogy lerakódjon a csatornafénéken.

A nagy sebesség és a zagykoncentráció miatt a vasbeton csatorna felülete sok helyen erősen erodálódott (4.10. ábra). A koptató hatás miatt a csatorna belső fala szabálytalan alakúvá vált. A nagy sebesség és a görbült vonalvezetés miatt a víz felszíne az egyik oldalt megemelkedett. A sérült betonfelület miatt az áramlási viszonyok megváltoztak, így a zagy egy része kifolyt a csatornából. Ez okozta a fő problémát a csatorna használata szempontjából.



4.10. ábra: Zagycsatorna eróziója [Balázs - Tóth, 1998]

A szerkezet javításakor így nem csak a beton megkopott felületének pótlását kellett elvégezni, hanem egyes részeken (hővezetőlegesen 30cm-rel) magasították a csatorna oldalfalát is.

Másik gyakorlati példaként lehet említeni a 4.11. ábrán látható, Szentgotthárdnál található zsilipet, ahol a víz és az általa szállított hordalékok koptató hatása, illetve a megtelepült növények eróziós hatása együttesen jelentkezik.



4.11. ábra: Szentgotthárdnál levő zsilip betonjának korróziója a víz koptató hatása, illetve a megtelepült növényzet miatt [Nehme, 2013]

4.6. Biológiai károsító hatások

A biológiai hatások miatt betonkorrózióra több gyakorlati példát hoztam már a diplomamunkám korábbi fejezeteiben. Többek között a szennyvizekben levő baktériumok károsító hatása (4.5. ábra), vagy a beton felületén megtelepült kisebb növények gyökérzetének károsító hatása (4.11. ábra).

Következőkben egy fa növekedésének betonra gyakorolt károsító hatását mutatom be. Sopronban az év elején tapasztaltam a 4.12. ábrán látható károsodását. A képen látható, hogy amikor az udvar térbetonját készítették, még a fa kisebb lehetett. Nem gondoltak a kivitelezéskor arra, hogy a fa törzse nőhet, így nem hagytak ki kellő helyet a betonozáskor a fa körül. Az idő múlásával a fa gyökérzete, illetve törzse megnőtt, és a betonra kifejtet feszítő erő hatására a burkolat összeroppedezett.



4.12. ábra: Betonburkolat tönkremenetele fa gyökérzetének feszítő hatása miatt (Kép készült: Sopron, 2013. 02. 09)

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Diplomamunkámban áttekintettem a beton, illetve vasbeton szerkezetek tipikus leromlási folyamatait. A beton lehetséges leromlási folyamatoként ismertettem a szulfát okozta duzzadási betonkorrózió, az oldódási betonkorrózió (cserebomlási korrózió, kilúgozási korrózió), az alkáli-adalék reakció, a fagy és koptató hatás miatti betonkorrózió, illetve a biológiai károsítók hatására bekövetkező korrózió mechanizmusait. Az acél lehetséges leromlási folyamatoként foglalkoztam a karbonátosodás okozta acélkorrózióval, illetve a kloridion hatására bekövetkező korrózióval. Továbbá ismertettem a repedések hatását a leromlási folyamatokra. Ezen kívül **gyakorlati példák**on is bemutattam a beton, illetve vasbeton szerkezetek leromlási folyamatait.

Saját vizsgálataim alapján ismertettem a Sentab típusú feszített vasbeton csöveknél tapasztalt leromlási folyamatokat és azok elemzését. Diplomamunkám mellékletében összefoglaltam a csőelemek típusait, gyártásukkor felhasznált anyagokat, gyártástechnológiájukat, illetve a gyártás során végzett ellenőrzéseket. Összefoglaltam a Sentab típusú csöveket érő környezeti hatásokat, majd az általunk elvégzett állapotvizsgálatokat. Az elmúlt 3 évben 8 üzem alatti és 10 üzemén kívüli, kiemelt csőelem állapotvizsgálatában vettem részt.

Meghatároztam, hogy mely leromlási folyamatok következtek be az általunk vizsgált Sentab típusú csövek esetén. Számos helyen is tapasztaltunk acélkorróziót. Két vizsgált rozsdafolt esetén a karbonátosodási mélység elérte a feszítőbetéteket, így feltehetően a huzalok depasszivációja miatt következett be a korrózió, míg a többi vizsgált rozsdafoltnál a nagy kloridion-tartalom okozhatta a korróziót. A vizsgált Sentab típusú feszített vasbeton nyomócsövek esetén betonkorrózióra utaló jeleket nem észleltünk.

Diplomamunkámban elemeztem, hogy milyen hatások játszottak szerepet a Sentab típusú csőelemek leromlási folyamatában. Ezek alapján **azt tapasztaltam, hogy a csöveken keletkezett hibahelyek legtöbbször ott alakultak ki, ahol a betonfedés túlzottan kicsi, illetve ahol a beton porózusabb volt**, mely feltehetően a gyártáshibákra vezethető vissza.

Ismertettem két olyan Sentab típusú cső vizsgálati eredményeit is, melyek néhány tíz méterre helyezkedtek el egymástól a beépítési állapotban. (Egyik aszfalt burkolat alatt volt, ahol rendszeresen síkosság-mentesítettek, míg a másik cső az út melletti füves park alatt helyezkedett el.) A két cső állapota jelentősen eltért egymástól, mely a vizsgálati eredményeink alapján az eltérő környezeti hatásokkal magyarázható. Tehát a vizsgálati eredményeink alapján a csövek állapota rövid távolságon belül is jelentősen eltérhetnek egymástól, mely fölhívja a figyelmet a feltárási helyek kiválasztásának fontosságára a csőszakasz állapotának becslése kapcsán.

Azokhoz a leromlási folyamatokhoz, melyeket a Sentab csövek vizsgálata során nem tapasztaltunk, diplomamunkámban más területekről származó gyakorlati példákat mutattam be.

Összességében a diplomamunkám készítése során átfogó ismeretanyagot szereztem beton, illetve vasbeton elem lehetséges leromlási folyamataival kapcsolatban.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik segítséget nyújtottak tudományos munkám elkészítésében.

Külön köszönöm konzulenseimnek,

- Dr. Balázs L. Györgynek,
- Dr. Majorosné Dr. Lublós Évának,
- Zimmer Péternek,

akik iránymutatásukkal és szakmai szakértelmükkel segítették tudományos munkám elkészítését.

Továbbá köszönöm az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék munkatársainak, a vizsgálatokban nyújtott segítséget.

Kiemelten köszönöm:

- Dr. Arany Piroska,
- Dr. Borosnyói Adorján,
- Csányi Erika,
- Eipl András,
- Emszt Gyula,
- Dr. Kopecskó Katalin,
- Dr. Nehme Salem Georges,
- Rónaky Viktória,
- Pálincás Bálint,
- Dr. Seidl Ágoston

segítségét, akik szakmai tanácsaikkal is elősegítették munkámat.

7. HIVATKOZÁSOK

- 346/2008. Korm. Rendelet: „346/2008. (XII. 30.) Korm. rendelet a fás szárú növények védelméről”, http://njt.hu/cgi_bin/njt_doc.cgi?docid=120067.244809 (letöltve: 2013. 09. 16.)
- autovezetes.network.hu (2010): „Hogyan sózzunk és mivel télen”, 2010. 01. 07., http://autovezetes.network.hu/blog/kozlekedes_klub_hirei/hogyan-sozzunk-es-mivel-telen (letöltve: 2013. 09. 15)
- Balázs Gy. (1994): „Építőanyagok és Kémia”, Jegyzet azonosító: 94493, Műegyetemi Kiadó, 655. p.
- Balázs Gy. (1995): „Beton és vasbeton II., Mélyépítési beton- és vasbeton szerkezetek története”, ISBN 963 05 6884 5, Akadémiai Könyvkiadó, pp. 752
- Balázs Gy., Tóth E. (szerk.)(1997): „Beton- és vasbeton szerkezetek diagnosztikája. I. kötet. Általános diagnosztikai vizsgálatok.”, ISBN 9634205445, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 396 p.
- Balázs Gy., Tóth E. (szerk.) (1998): „Beton- és vasbeton szerkezetek diagnosztikája. II. kötet. Esettanulmányok.”, ISBN 963 420 583 6, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 467 p.
- Balázs Gy., Erdélyi A., Kovács K. (1991): „A betonacél korróziója kloridok hatására”, *Építőanyagok*, 1991/6, pp. 202-219.
- Balázs L. Gy., Borosnyói, A., Kausay T., Kopecskó K., Lublőy É. (2011): „Oktatási segédlet, Építőanyagok – MSc.”, BMEE OEMMST7, 152 p., http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEE OEMMST7 (letöltve: 2013. 04. 07.)
- Balázs L. Gy., Borosnyói, A. (2013) I.: „Tartósság, teljesítőképesség, fenntarthatóság”, *Építőanyagok – MSc. 3. előadás*, 75. p., (2013. 02 27.) http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEE OEMMST7 (letöltve: 2013. 03. 25.)
- Balázs L. Gy., Borosnyói, A. (2013) II.: „Tartósság, teljesítőképesség, fenntarthatóság”, *Építőanyagok – MSc. 4. előadás*, 78. p., (2013. 03 06.) http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEE OEMMST7 (letöltve: 2013. 03. 25.)
- Balázs L. Gy., Lublőy É.(2008): „Repedéstágasság hatása a betonok tartósságára”, *Betonszerkezetek tartóssága* (szerk: Balázs Gy., Balázs L. Gy.), ISBN 978 963 420 954 6, pp. 329-340.
- Balázs L. Gy. – Kausay T. (2008): „Betonok fagy- és olvasztósó-állóságának vizsgálata és követelmények -1. értelmezés”, *Vasbetonépítés. X. évf. 4. szám* pp. 127-135.

- Breit, W. (1997): „Untersuchungen zum kritischen korrosionauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton”. Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Nr. 8/1997, Technische Hochschule, Dissertation
- Csányi E. (2006): „Oktatási segédanyag az építőmérnöki kémia tárgyhöz”, http://www.epito.bme.hu/eat/oktatas/feltoltesek/BMEEOEMAT02/epitomernoki_ke_mia_oktatasi_segedanyag.pdf (letöltve: 2013. 09. 14.)
- Csányi E., Czirják J., Kovács K., Migály B., Pluzsik T., Nehme S. G., Kleine Cs., (2013): „Szulfátálló cementek kézikönyve”, Pluzsik T. (Szerkesztő), Holcim Magyarország Kft., Premier Nyomda Kft., 92. p.
- Drescherné H. A. (2004): „A Mohácsi Üzemvezetőség”, DRV Hírek, http://www.driv.hu/driv/driv_files/File/DRV%20H%EDrek/DRV%20Hirek%202004%20junius.pdf (letöltve: 2013. 07. 04.)
- ffstatika.blog.hu: „Schmidt kalapács”, FF Statika Hungary Építőmérnöki Kft., http://ffstatika.blog.hu/2013/04/20/schmidt_kalapacs (letöltve: 2013. 09. 15.)
- fib bulletin 34 (2006): „Model Code for Service Life Design”, Model Code prepared by Task Group 5.6, ISBN 2-88394-074-6, 110. p.
- fib bulletin 49 (2009): „Corrosion protection of reinforcing steel”, Technical report prepared by Task Group 9.7, ISBN 978-2-88394-089-5, 116. p.
- fib bulletin 53 (2009): „Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance”, Second edition, Volume 3, ISBN 978-2-88394-093-2, 376. p.
- fib bulletin 59 (2011): „Conditional control and assessment of reinforced concrete structures”, State-of-Art Report prepared by Task Group 5.8, ISBN 978-2-88394-099-4, 63. p.
- fib MC2010: fib Special Activity Group 5, New Model Code: „fib Model Code for Concrete Structures 2010”, ISBN 978-3-433-03061-5, Germany, Wilhelm Ernst & Sohn, 402. p.
- Fogarasi Gy. (1981): „A feszített vasalás technológiája”, ISBN 963 431 330 2, Budapesti Műszaki Egyetem Mérnöki Továbbképző Intézete, Budapest, 161 p.
- Fogarasi Gy. (1986): „Prestressed Concrete Technology”, ISBN 963 05 4206 4, Akadémia Kiadó, Budapest, 317. p.
- Fürtös A. (2011): „Víziközmű vagyonértékelés folyamata, hatása és eredménye – esettanulmány”, MaSzeSz XII. Országos konferencia, Megvalósított csatornázási és szennyvíztisztítási beruházások értékelése, http://www.maszesz.hu/download/lajosmizse-2011/Fustos_Andras.pdf (letöltve: 2013. 06. 19.)

- inti.gob.ar: „Alkali-Aggregate Reaction (AAR) of Concrete Structures”,
http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/tecnologia_hormigon/alkai_aggregate_reation_of_concrete_structures.pdf (letöltve: 2013. 11. 27.)
- Kausay T. (2011): „Betonok környezeti osztályai“, 12. p.,
<http://www.betonopus.hu/notesz/kornyezeti-oszt-csiksomlyo.pdf>, (letöltve: 2013. 09. 27.)
- Kausay T. (2013): „Beton, a betonszabvány néhány fejezetének értelmezése”, Oktatási és továbbképzési kiadvány, Mérnöki Kamara Nonprofit Kft., ISBN 978-963-88358-4-0, Budapest, 334. p.
- Kazimir, Julius (1978): „Karbonátos betonadalékanyag kémiai állandóságának vizsgálata”, Építőanyag, XXX. évfolyam. 1978. 8. szám. pp. 304-306. 1978.
- Kocur G. K, Saegner E. H, Vogel T. (2010): „Elastic wave propagation in a segmented X-ray computed tomography model of concrete specimen”, Construction and Building Materials, Szám. 24 pp.:2393-2400.
- Kocsányiné Kopecskó K. (2004): „Az acélbetét korróziója kloridok hatására”, Diplomamunka, Szerkezetépítő Szakmérnöki Tanfolyam, Betontechnológia Ágazat, Konzulens: Balázs György, 2004. 06. 10., 83. p.
- Kocsányiné Kopecskó K. (2006): „A gőzölés hatása a cement klinkerek és cementek kloridion megkötő képességére”, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tudományos vezető: Balázs György, 100. p.
- Kopecskó K.: „Fázisanalitikai módszerek alkalmazása a mérnöki gyakorlatban”,
http://www.epito.bme.hu/eat/dolgozok/feltoltesek/kopecskok/fazisanalitikai_modszerk.pdf, (letöltve: 2013. 10. 07.)
- Lamond J. F., Pielert J. H. (2006): „Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials”, ASTM International, 664 p.
- Lengyel G., Sármay A., Csiki B. (2010): „A Budapesti Központi Szennyvíztisztító Telep, 1. A projekt általános ismertetése”, Vasbetonépítés, ISSN 1419-6441, 2010/1, évf.: 12, szám: 1, pp. 1-6
- Lindquist W. D., Darwin D., Browning J., Miller G. G. (2006): „Effect of Cracking on Chloride Content in Concrete Bridge Decks”, ACI Materials Journal, V. 103, No. 6, pp. 467-473.
- Longworth I. (2008): „Sulfate damage to concrete floors on sulfate-bearing hardcore Identification and remediation”, Department for Communities and Local Government, ISBN-13 978 1 85946 301 7, 40 p.
<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20120919132719/www.communities.gov.uk/documents/planningandbuilding/pdf/703049.pdf>, (letöltve: 2013. 11. 28.)

- Lublóy, É. (2012): „CT komputer tomográfia mérnöki alkalmazási lehetőségei”, *Szerkezetek diagnosztikája – MSc. (BMEEOEMMAT1) előadás, 2012. 05. 02., 21. p.*, http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOEMMAT1, (letöltve: 2013. 05. 14.)
- Majorosné Lublóy É. E. (2011): „CT alkalmazási lehetőségei a beton roncsolásmentes vizsgálatainál”, *Diplomamunka, Szerkezetépítő Szakirányú Továbbképzés, Betontechnológia Ágazat, 77. p.*
- Mester, J. (1978): „BVM – SENTAB nyomóvezetékek, Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium Műszaki Előírás, Építésügyi Tájékoztatási Központ Nyomdaüzeme, Azonossági szám: 579/77, 138 p.
- MEASZ ME-04.19:1995: „Beton és vasbeton készítése. Műszaki előírás.” 11. fejezet. Alkálikovasav és alkáli-karbonát reakciónak ellenálló betonok.
- mno.hu (2012): „Több száz köbméternyi víz zúdult a 4-es metró állomására + Képek”, 2012. 07. 01., http://mno.hu/belfold_archiv/tobbszaz-kobmeternyi-viz-zudult-a-4-es-metro-allomasara-kepek-1087931 (letöltve: 2013. 07. 12.)
- MSZ 14043-10:1982: „Talajmechanikai vizsgálatok. A talajvíz szulfátion-tartalmának és pH-értékének meghatározása”, ICS:19.020, Magyar Szabványügyi Hivatal, 1983. 03. 15., 3p.
- MSZ 18290-1:1981: „Építési kőanyagok felületi tulajdonságainak vizsgálata. Kopási vizsgálat Böhme módszerrel”, ICS:91.100.15, Ásványi anyagok és termékek, 1981. 08. 15
- MSZ 4798-1:2004: „Magyar Szabvány, Beton 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon”, ICS 91.100.30, Magyar Szabványügyi Testület, 2004. szeptember, 77. p.
- MSZ EN 206-1:2002: „Beton 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés”, 2. kiadás, ICS 91.100.30, Magyar Szabványügyi Testület, 2004. szeptember, 77. p.
- Nehme S. G. (2004): „A beton porozitása”, PhD értekezés, 122. p. <http://www.epito.bme.hu/eat/tudomanyosfokozatok.php>, (letöltve: 2011. 03. 10.)
- Nehme S. G. (2008): „A porozitás hatása a beton tartósságára”, *Betonszerkezetek tartóssága* (szerk: Balázs Gy., Balázs L. Gy.), ISBN 978 963 420 954 6, pp. 127-140.
- Nehme S. G. (2013): „A tartósság fogalma, gyakorlati értelmezése, fokozásának módszerei”, *Szerkezetek védelme és javítások tervezése előadásdió*, 107. p.

- Neville A. M. (1995), „*Properties of concrete*”, Longman House, Essex, England, Fourth and Final Edition, pp. 569-571.
- Nischer P., Hartl G. (1983): „*Dauerhaftigkeit von Beton - Chloridkorrosion. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabrikanten*”, Heft 37, 53 p.
- Pavlik V. (1994): „*Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids; Part I: Calculation of corrosion depth. Cem. Concr. Res. 24, pp. 551-562.*
- Pethő Cs. (2013): „*Saválló kerámiabeton*”, előadás dia, 43 p.
- Puskásné Hógyes I. (1978): „*A dunántúli dolomitok alkalmassága építési célra*”, *Építőanyag, XXX. évfolyam. 1978. 8. szám. pp. 307-314.*
- Schießl, P. (1976): „*Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons*”, Berlin, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 175 p.
- Schießl P., Raupach M. (1990): „*Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete*”. London: Elsevier – In: *Corrosion of Reinforcement in Concrete, International Symposium, Wishaw, Warwickshire, UK, May 21-24, 1990, (Page, C.L.; Treadaway, K.W.J.; Bamforth, P.B. (Ed.). pp. 49-58*
- Spráncz F. (2008): „*Betonok tartóssága a gyakorlatban*”, *Betonszerkezetek tartóssága (szerk: Balázs Gy., Balázs L. Gy.)*, ISBN 978 963 420 954 6, pp. 349-361.
- Springenschmid, R. (2007): „*Betontechnologie für die Praxis*”, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin,
- sulinet.hu: „*Szeged korszerű vízellátása*”,
http://www.sulinet.hu/oroksegtar/data/tudomany_es_ismeretterjesztes/Szeged_varos_vizellatasanak_kronikaja/pages/006_korszeru_vizellatas.htm (letöltve: 2013. 07. 10.)
- tettyeforrashaz.hu: „*Ivóvíz minőség honlapra-2013 I n év - Tettye Forrásház Zrt.*”,
www.tettyeforrashaz.hu/item/get_item.php?id_embed=514 (letöltve: 2013. 09. 18.)
- Török Á. (2012): „*Műemléki közetek diagnosztikája*”, előadás anyag, 2012. 05. 03., 76 p.,
http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOEMMA08, (letöltve: 2013. 11. 27.)
- Tuutti K. (1982): „*Corrosion of steel in concrete*”, *Forskning Research Stockholm*, pp 4-82.
- Ujhelyi J. (1998): „*A beton struktúrája*”, BME építőmérnöki kar Szerkezetépítő szakmérnöki szak – *Betontechnológiai ágazat jegyzete, Budapest.*

Ujhelyi J. (2005): „Beton-ismeretek”, Egyetemi tankönyv, ISBN 963 420 833 9, Műegyetemi Nyomda, Budapest, 346. p.

understanding-cement.com: „Sulfate attack in concrete and mortar”, WHD Microanalysis Consultants Ltd., <http://www.understanding-cement.com/sulfate.html> (letöltve: 2013. 11. 28.)

vizmuvek.hu: „Vízminőség, vízkeménység,, http://vizmuvek.hu/hu/fovarosi-vizmuvek/lakossagi-ugyfelek/altalanos_informaciok/vizminoseg_vizkemenysege (letöltve: 2013. 08. 12.)

Woods H. (1968): „Durability of Concrete Construction. ACI Monograph, No. 4., 187 p.

Zimmer P., Kereszturi P. (1997): „SENTAB csövek a Fővárosi Vízművek Rt.-nél”, Vízű Panoráma, évf. 5, szám 3, pp. 32-33.

Zsigovics I., Szilágyi K. (2008): „Nagy teljesítőképességű betonok szennyvíztisztító műtárgyak tartósságának fokozásához”, Betonszerkezetek tartóssága, szerkesztő: Balázs Gy., Balázs L. Gy., ISBN 978 963 420 954 6, pp. 49-74

8. NYILATKOZAT

Alulírott Czoboly Olivér Attila kijelentem, hogy a diplomamunkát saját magam készítettem el, és az abban megadott forrásokat használtam fel.

Budapest, 2013. december 9.

.....

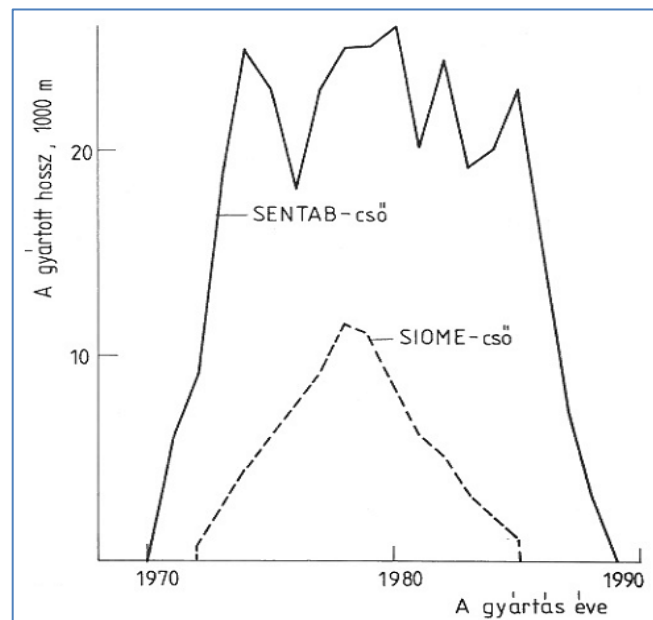
Czoboly Olivér Attila

MELLÉKLET

M.1. melléklet: Sentab csőelemek jellemzői

A Sentab csöveket svéd szabadalom szerint szovjet berendezések felhasználásával kezdték el gyártani hazánkban. A svéd SENTAB-Trickröör cég fejlesztette ki a feszített beton nyomócsövek vibrohidroprésléses gyártástechnológiáját [Fogarasi, 1981]. A Sentab csövek gyártását a Beton- és Vasipari Művek (továbbiakban BVM) Szentendrén létesített új gyárában végezték.

Megkeresve Tápai Antalt (a BVM Épelem Kft. nyugalmazott műszaki igazgatóját) és Szalva Tamást (a BVM Szentendrei Gyárának nyugalmazott főmunkatársát), kiderült, hogy Sentab cső összesen mintegy 360 km hosszúságban készült (különböző átmérővel) a szentendrei gyárban. Az *M.1. ábrán* jól megfigyelhető az 1970 és 1988 között gyártott Sentab csövek hosszának évenkénti megoszlása.



M.1. ábra: 1970 és 1988 között gyártott Sentab csövek mennyiségi eloszlása [Balázs, 1995]

A Sentab csöveket hozzávetőlegesen 5 méteres hosszban gyártották, melyeket tokos kapcsolattal illesztettek egymáshoz. A megfelelő vízzárás biztosítása végett tömítő gumigyűrűt helyeztek el a két cső illesztésénél. A tömítő gyűrűket a csövekkel és a hozzájuk tartozó idomokkal együtt szolgáltatta a BVM. A csövek összehúzásakor a gumigyűrű az iparban addig nem alkalmazott új technológia szerint, gördülés útján kerül a helyére. A tömítőgyűrűk természetes vagy mesterséges műkaucsuk alapú tömör lágygumiból készültek.

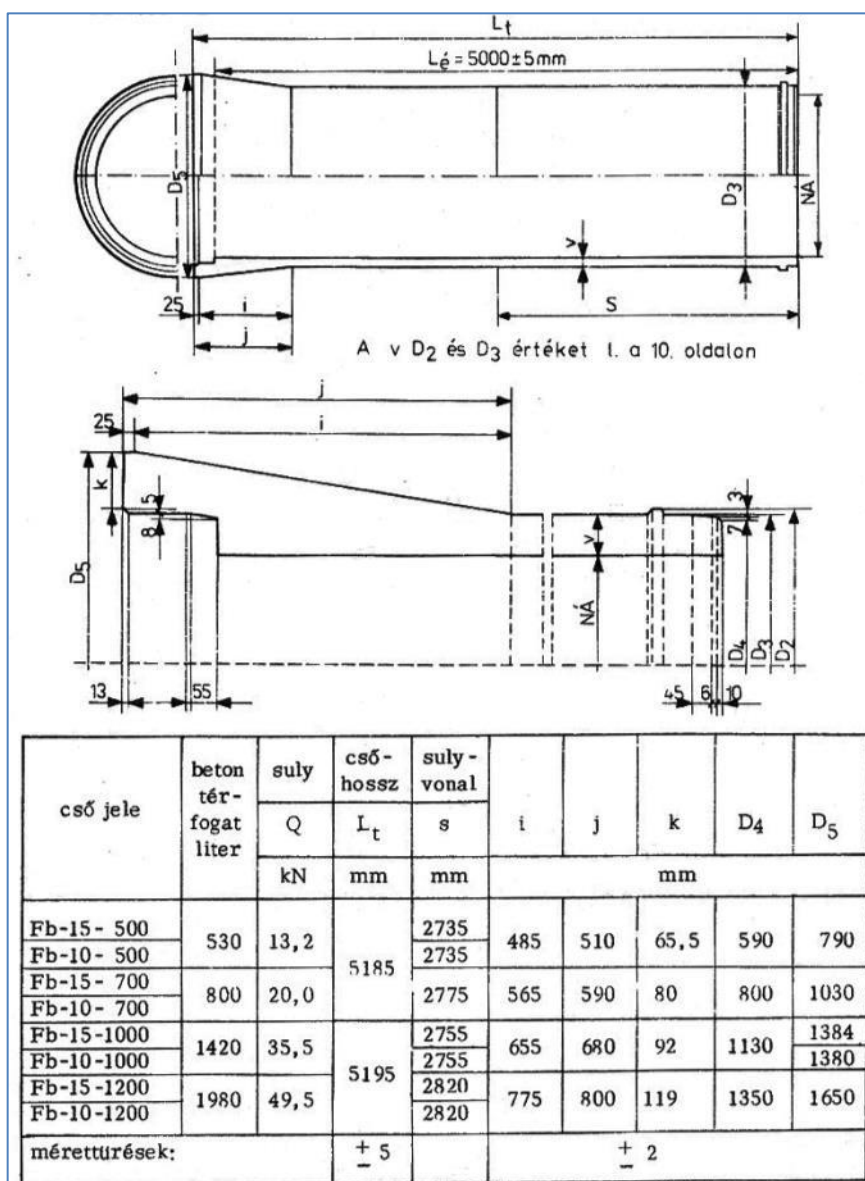
M.1.1. melléklet: Sentab csövek típusai

A BVM – Sentab nyomóvezetékéről készült Műszaki Előírás [Mester, 1978] alapján a következő csőtípusokat gyártották:

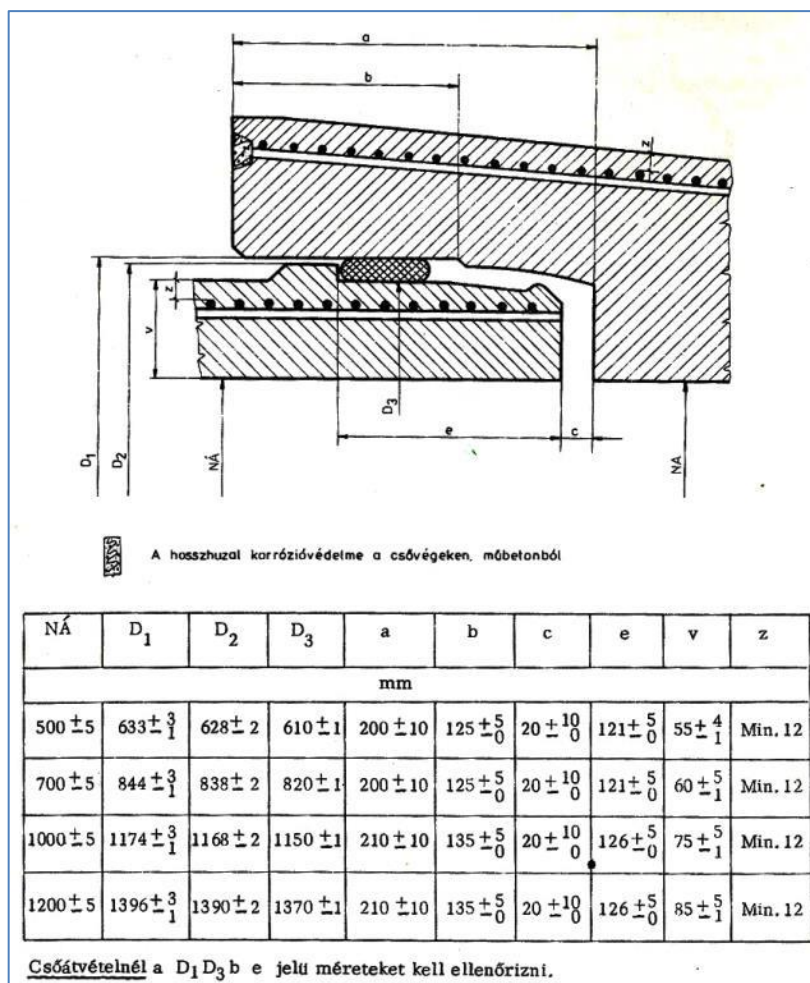
- | | |
|---------------|---------------|
| - Fb-10- 500, | - Fb-15- 500, |
| - Fb-10- 700, | - Fb-15- 700, |
| - Fb-10-1000, | - Fb-15-1000, |
| - Fb-10-1200, | - Fb-15-1200. |

(A csövek megnevezése három részből állt. Az első „Fb” betűjel a feszített betonra utalt, a második rész számjele a cső névleges nyomását adja meg bar értékben, míg a harmadik számjel a névleges átmérőt adta meg milliméterben.)

A Sentab csövek kialakítási vázrajzát és az egyes típusainak méreteit az M.2. ábra, illetve az M.3. ábra tartalmazza.



M.2. ábra: Sentab csövek kialakítása és méretei [Mester, 1978]



M.3. ábra: Sentab csövek csatlakozásának kialakítása és azok előírt méretei [Mester, 1978]

M.1.2. melléklet: Sentab csövek gyártástechnológiája

Balázs [1995] alapján a csöveket **B500 szilárdsági jelű betonból** készítették, amihez a beton nyomószilárdságának átlaga – 200 mm élhosszúságú kockán mérve – legalább 50 N/mm²-nek kellett lennie. (Ma hozzávetőlegesen az MSZ EN 206-1:2002 szerint C30/37 betonszilárdsági osztálynak felelne meg, míg az Eurocode 2 ma érvényes változata, MSZ EN 1992-1-1:2010 alapján C25/30, vagy C30/37 szilárdsági osztályba tartozna, attól függően, hogy a B500 szilárdsági osztályon belül gyengébb, vagy jobb minőségű volt a beton.)

A csövek betonjának gyártásához **500-550 kg/m³ cementet** használtak fel, a **víz-cement tényező 0,35-0,38** között volt [Balázs, 1995]. Agresszív talajvizek ellen **S54 jelű szulfátálló cementet** használtak [Mester, 1978]. Adalékanyagként **nedves osztályozással előkészített dunai kavicsot és homokot** alkalmaztak. Tápai Antal és Szalva Tamás tájékoztatása alapján **MELMENT L-20 típusú képlékenyítő adalékszer** használtak a megfelelő konzisztencia előállításához. (A MELMENT L-20 az akkori egyik legkorszerűbb adalékszer volt. Ennek beszerzése behozatali engedélyköteles volt, azonban ezt az engedélyt mindig megkapták a Sentab csövek gyártásához.)

A MELMENT L-20 típusú képlékenyítő adalékszer nem tartalmazott kloridiont, ellentétben több akkori adalékszerrel.)

A Sentab csöveknél **hosszanti irányban és spirálisan is feszítőhuzalokat** alkalmaztak. Az általam vizsgált Sentab csövek mindegyikében **sima felületű, 3-6 mm (elsősorban 5 mm) átmérőjű** spirális feszítőhuzalok kerültek beépítésre. A műszaki előírás [Mester, 1978] alapján **12 mm minimális betonfedés** volt előírva a csövek gyártásánál.

Tápai Antal és Szalva Tamás tájékoztatása alapján a csövek sablonja esztergálással került kialakításra. Az **1000 mm átmérő alatti csövek** esetén **2 szegmensből állt a zsalu**, míg **1000 mm átmérőtől 4 szegmensből** voltak összerakva a zsaluk. A **sablonszegmenseket rugós csavarokkal fogták össze**. Az illesztéseket ipari szalaggal tömítették.

A **zsaluillesztéseknél** használt **tömítőszalagot** a csövek helyszíni vizsgálata során sikerült nyomokban megtalálnom hozzávetőlegesen a beton külső felülete alatt 1 cm-rel (M.4. ábra). Ebből arra tudok következtetni, hogy a beton be tudott jutni a zsalu és a tömítőszalag közé, így esetleg a cementpép egy része kiszivároghatott a zsaluillesztéseknél. Ez tartóssági szempontból kritikus hely lehet, így vizsgálataim során fokozott figyelmet szenteltem a zsaluillesztéseknek.



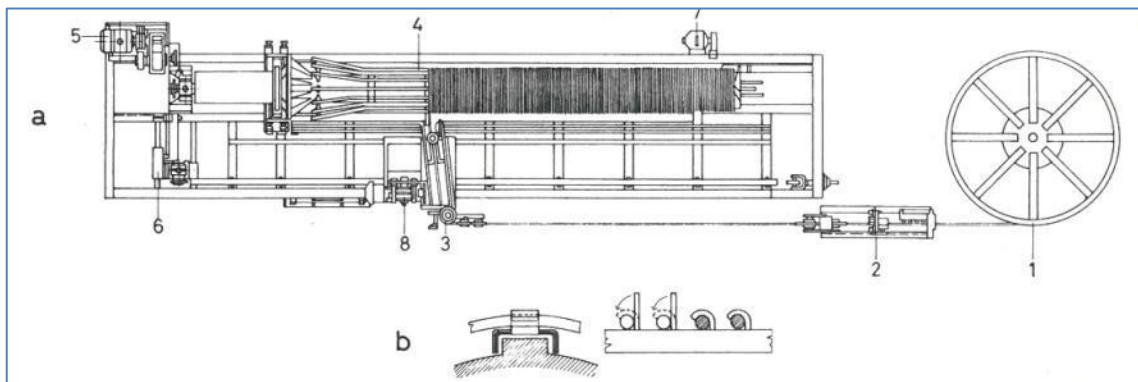
M.4. ábra: Fb-10-1200 típusú Sentab cső zsaluillesztésénél használt tömítő szalag (Kép készült: 2013. 07. 18.)

A gyártás a spirálhuzal-rendező lécek legyártásával kezdődött, melynél vékony lemezszalagból olyan U keresztmetszetű elemeket gyártottak, melyek az előírt huzal osztásköznek megfelelő lefogó füleket tartalmazott (M.5. ábra)



M.5. ábra: Az egyik helyszíni vizsgálatom során feltárt spirálhuzal-rendező lécz (Kép készült: 2010. 11. 04.)

A hosszhuzalokat a huzal-előkészítő és gombozó berendezésen pontos méretre vágták, és végüket a technológiai lehorgonyzásra szolgáló duzzasztással képezték ki. A vasalás előkészítő munkahelyen végezték a hosszhuzalok külső acélsablonra való feszítését. A hosszirányú feszítőbetéteket kézi feszítőpuskával, szálanként feszítették meg. A sűrűmenetű spirálvasalás rendezőlécekre tekercselését is a vasalás előkészítő munkahelyen végezték (M.6. ábra).



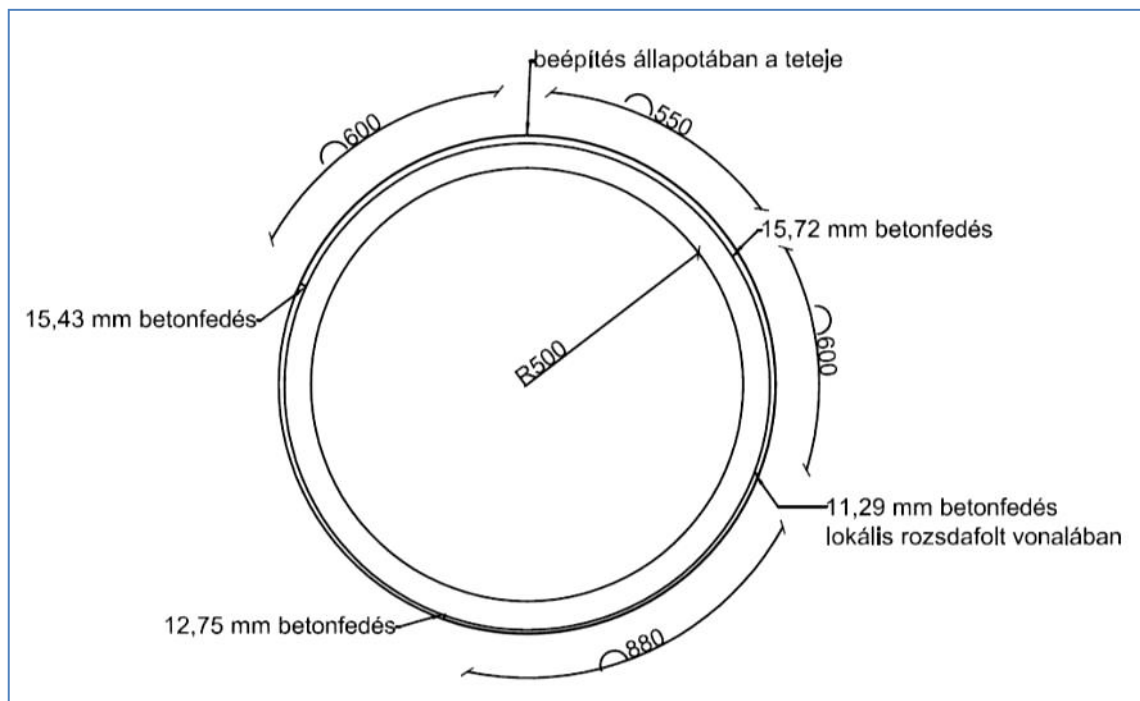
M.6. ábra: A svéd SENTAB cég spirálhuzal-váz készítő berendezése [Fogarasi, 1986]
a) gép vázlatos alaprajza, b) spirálhuzal rögzítésére szolgáló acél füleslécek a rotoron zárás előtt és után. 1) huzaldob, 2) egyengető és fékező, 3) huzalfeladó, 4) tekercselő rotor a ráerősített füleslécekkel, 5) forgató motor, 6) huzalelőtoló motor, 7) a rotor csapszegét mozgató rotor

A rendezőlécek elméletben biztosították a spirálisan futó feszítőbetétek megfelelő alakját, de a megfelelő betonfedés biztosítására nem voltak alkalmasak. A sablonban való pozicionáláshoz műanyag távtartókat használtak (M.7. ábra).



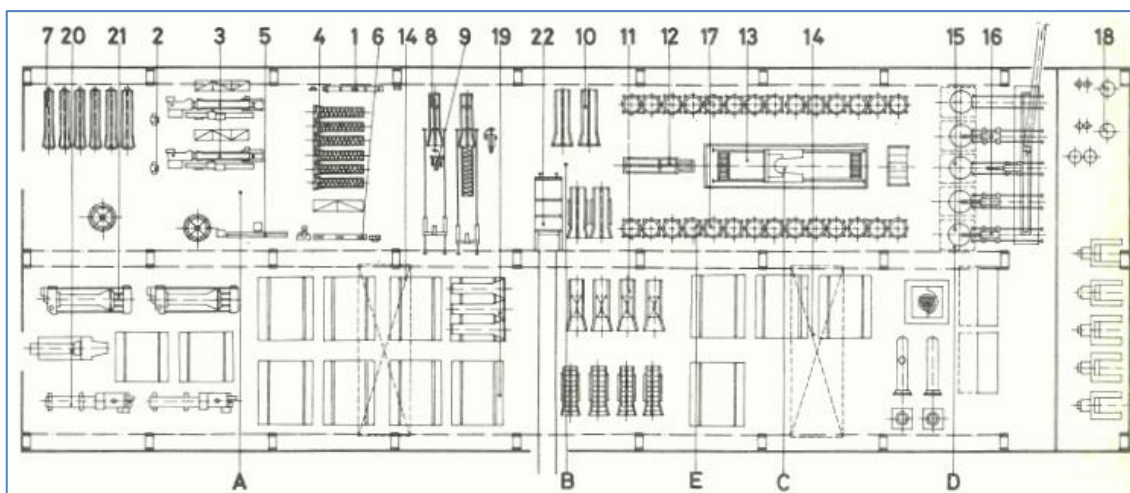
M.7. ábra: Spirális feszítőhuzal pozicionálásához használt műanyag távtartó (Kép készült: 2012. 07. 06.)

Vizsgálati tapasztalataink alapján megállapítható, hogy egyes esetekben a spirálisan futó feszítőhuzal elmozdult a zsaluzatban, így a cső egyik oldalán nagyobb betonfedés volt, míg a vele átellenes oldalon a tervezett betonfedés érték nem volt biztosítva. Az M.8. ábrán is látható, hogy a tervezett érték alatti betonfedés vonalában lokális rozsdafoltot találtam. A rozsdafolt kialakulása feltehetően összefüggött a kicsi betonfedéssel. Ezek alapján arra tudok következtetni, hogy nem használtak megfelelő számú műanyag távtartót.



M.8. ábra: Spirálisan futó feszítőbetét elhelyezkedése beépítési állapotban ábrázolva

A befestített külső sablonokat és a gumiköppennyel ellátott belső sablonokat a sablon-összeszerelő aknában szerelték össze (M.9. ábra 13. munkarész). Az aknától hídaruval a betonozó helyek egyikére emelt sablont álló helyzetben csigás betonadagolóval töltötték meg és vibrálással tömörítették [Fogarasi, 1986].



M.9. ábra: Átnézeti rajz a Sentab csövek szentendrei gyáráról [Fogarasi, 1986]

A) vasalás-előkészítő, B) forma előkészítő, C) zsalu összeszerelő, D) betonozó hely, E) préselő és érlelő hely, 1) Spirálhuzal-rendező lécz gyártó gép, 2) Spirális feszítőhuzal huzaldobok, 3) Spirálhuzalváz készítő berendezés, 4) Kész spirálhuzalváz, 5) Hossz feszítőbetétek vágása, 6) hosszhuzalok gombozó berendezése, 7) Feszítőhuzal-dobok, 8) Előkészítő, 9) Hosszbetétek feszítése, 10) Külső zsaluhéjak, 11) Belső zsaluk, 12) Belső zsalu, 13) Sablon összeszerelő akna, 14) Híddaru, 15) Betonozó helyek, 16) Csigás betonadagoló, 17) Préselő-érlelő helyek, 18) Szivattyú gépház, 19) Belső tárolótér, 20) Tokcsiszoló berendezés, 21) Tesztelő berendezések, 22) Él terhelő berendezések a kész csövekhez

Ezt követően a sablont a préselő-érlelő helyek egyikébe vitték, ahol a szivattyúgépházból nyomóvízvezetéken 30-35 atmoszféra nyomású vizet a belső acélsablon és a gumiköpeny közé vezetve a spirálhuzalok feszítését és ezzel együtt a beton második ütemű tömörítését végezték el [Fogarasi, 1981]. A beton a belső sablon gumiköpenyének közvetítésével 2,3-3,5 MPa nyomást kapott, melynek hatására a rugós kötésű sablon kitágult. (A külső sablonszegmensek összeszorítását végző rugós elemek erő alapján szabályozták a sablontágulás mértékét.) Ezáltal a beton egy tömörítő nyomásnak volt kitéve. Ez a belső nyomás feszítette meg a spirális feszítőhuzalt. A nyomást fenn kellett tartani addig, amíg a beton a gőzölés hatására a 40 N/mm^2 szilárdságot el nem érte. A belső nyomás megszűnésekor a betonban $12-18 \text{ N/mm}^2$ nyomófeszültség keletkezett a spirálisan futó feszítőhuzal hatására, míg a hosszirányú feszítésből $2-2,5 \text{ N/mm}^2$ feszültség alakult ki [Balázs, 1995].

A belső tárolótérben 3 napnyi gyártási termék természetes utóérlelésére volt elegendő hely. Azt követően a csövek tokjait tokcsiszoló-berendezésen, a gördülő gumigyűrűs csatlakozás által megkívánt pontosságra csiszolták.

Már a gyártáskor felismerték a hosszirányú feszítőhuzalok korrózióvédelmének fontosságát. Tápai Antal és Szalva Tamás tájékoztatása alapján a hosszirányú huzalok végére 50 mm hosszú kúpos műanyag gyűrűket húztak, majd a beton megkötése után a gyűrűket eltávolították. Az így szabaddá vált huzalokat elektródával „kiegítették” és a keletkezett üregeket epoxigyantával töltötték ki (M.3. ábra).

Tapasztalataink alapján a hosszanti acélbetétek végeinek korrózióvédelme nem volt megfelelő. Több helyen rozsdafoltot figyeltünk meg a beton felületén. Ezeknek a korróziós helyeknek a vizsgálatára fokozott figyelmet szenteltünk. Fontos kérdés, hogy ezek a rozsdásodások a teljes csőelem tartóssága szempontjából milyen hatással lehetnek?

A csövek végénél a spirálisan futó feszítőbetétet lerögzítették. Ehhez két laposacélt alkalmaztak, mellyel a spirálisan futó feszítőhuzal előző menetéhez tudták hozzáfogatni a spirálisan futó feszítőhuzal végét (*M.10. ábra*). A helyszíni vizsgálataink során több csövön is megfigyelhető volt ezeknek a lehorgonyzó elemeknek a korróziója. Fontos kérdés, hogy a lerögzítések korróziója milyen mértékben befolyásolhatja a teljes cső leromlásának felgyorsulását?



M.10. ábra: Sentab cső spirálisan futó feszítőhuzal végének rögzítő eleme (Kép készült: 2013. 10. 08.)

A gyártás közben táskásodott csövek javítását megengedte a műszaki előírás [Mester, 1978]. A javításkor először meg kellett állapítani a táskásodott felület határait. A hiba összes felülete nem haladhatta meg a 2 m²-t, illetve a kerület 25%-ánál nagyobb ívet nem foghatott át. A javításkor a táskásodott felületet kb. 30×30cm-es hálóban átfúrták a vasalásig. A lyukakon keresztül műgyanta javítóanyagot injektáltak be. A javítóanyag 80% EPORESIT EB-14 és 20% T-30 térhálósítóból állt. Az injektálást úgy kellett elvégezni, hogy a javítóanyag a táskásodott felület alatti hézagokat kitöltse.

A javítást követően, 24 óra elteltével a csöveket 16, illetve 23 bar nyomás alá kellett helyezni. Ennek hatására a csövön repedés, szivárgás nem léphetett fel. Továbbá kopogtatással ellenőrizni kellett, hogy a táskásodás alatti hézagot a javítóanyag teljesen kitöltötte-e. Az így javított csöveket az ép csövekkel egyenértékűnek vették.

M.1.3. melléklet: Sentab csövek gyártás során és beépítéskor végzett ellenőrzései

A csövek méreteit 1 mm pontosságu mérőeszközzel végezték. (A mérettűrések értékei az *M.2. ábrán* és az *M.3. ábrán* vannak feltüntetve.)

Minden megvizsgálásra került csövet vízzel való próbanyomással is ellenőriztek. A próbanyomást 3 napos korban végezték, amikor 13, illetve 18 bar nyomást kellett elviselniük az egyes csőelemeknek. A próbanyomáskor a csövek végződéseit a szokásos

gördülő gumigyűrűs tömítésű elemmel kellett lezárni, annak érdekében, hogy ne csak a cső, hanem a kötés vízzárósága is ellenőrizhető legyen. A nyomást 1bar/perc sebességgel kellett a megadott értékig növelni, majd azt 30 percen át tartani. A próbanyomás közben szivárgás, csöpögés, nedvesedés sehol sem jelentkezhett [Mester, 1978].

A próbanyomás során a „vasak tengelyében mért legfeljebb 0,1 mm vastag repedés mutatkozhat”-ott [Mester, 1978].

Tápai Antal és Szalva Tamás tájékoztatása alapján: „A csövek legfontosabb paramétere az, hogy a tervezett víznyomást megfelelő biztonsággal elviselje. Ezért minden egyes csövet a névleges nyomás +30% nyomással próbanyomásnak vetettek alá. A csöveket a minősítéshez ún. robbantásnak is alá vetették, ami azt jelenti, hogy 12 másodperc alatt 38 bar nyomással próbálták. A cső ezt a terhelést károsodás nélkül elviselte. Érdemes megjegyezni, hogy a próbanyomás idején a csövek keresztirányú alakváltozása átmérőben az 1-2 mm-t is elérte.”

A csöveknél 28 napos korban a szilárdságvizsgálatot, illetve nyomáspróbát végeztek (M.1. táblázat). Az előírt betonszilárdságot próbakockán ellenőrizték.

M.1. táblázat: 28 napos korban elvégzendő vizsgálatok előírt értékei [Mester, 1978]

Jel	NYOMÁSOK		ÉLTEHER Repesztő P kN/m
	próba PNY	repesztő RNY	
	bar		
Fb-10- 500	16	23	70
Fb-10- 700			80
Fb-10-1000		25	100
Fb-10-1200			120
Fb-15- 500	23	27	80
Fb-15- 700			90
Fb-15-1000		29	120
Fb-15-1200			

A csöveknél a felület állapotát szemrevételezéssel ellenőrizték. A felületi hibák megengedett mértékét az M.2. táblázat tartalmazza. (Szükség esetén a hiba mértékét mérésel ellenőrizték.)

Az M.2. táblázatban szereplő hibák csak abban az esetben voltak megengedettek, ha azok nem okozhatták a cső teherbírásának csökkenését, vízzáróságának romlását.

M.2. táblázat: Megengedett felületi hibák mértéke [Mester, 1978]

A felület állapotának leírása	A hiba megengedett mértéke
Üregek, fészkeség és dudorok a csövek és idomok külső felületén, a tokos és csapos vég csőkötésre kialakított részének kivételével	5 mm-nél nem mélyebb (magasabb) és 20 mm-nél nem nagyobb átmérőjű hibák Megengedettek
Kagylók, üregek, fészkeség, dudorok és lepattogzások a tok teljes belső felületén és a csap teljes külső felületén és a csapos vég véglapján	3 mm-nél nem mélyebb (magasabb) és 30 mm-nél nem nagyobb átmérőjű hibák Megengedettek
A belső cső- és idomfelületen max. 0,1 mm tágasságú szerkezeti repedés max. 150 mm és max. 3x3x3 mm méretű üreg	Megengedett
A cső külső felületén 0,1 mm-nél nem tágasabb, az elem teherbírását és tartósságát nem befolyásoló, nem átmenő repedés	Megengedett
Idomok esetében repedés a betonfelületen:	0,2 mm-nél kisebb tágasságú: Megengedett
Lepattogzás a külső felületen a csap külső felületének és a tok belső felületének kivételével	5 mm-nél nem mélyebb és 50 mm-nél nem hosszabb hibái: Megengedett
A nyomócsövek homlokfelületein, a feszítőhuzalok végeinél keletkezett lepattogzások	Nem lehetnek
A felület állapotának leírása	A hiba megengedett mértéke
Sorják és lepattogzások a tok bevezető peremén	3 mm-nél nem mélyebb ill. magasabb és 10 mm átmérőnél nem nagyobb: Megengedett
A huzalvégeket legalább 5 mm mélységig ki kell égetni, s az így képződött mélyedést műgyantabarccsal ki kell tölteni.	
Hosszanti mélyedések vagy dudorok a csapos végen, a gumigyűrű elhelyezkedési helyén:	Nem lehetnek
Kéreg alatti kongó hangot adó elválás	Nem lehet

A külső felület állapotát kopogtatással kellett ellenőrizni. A kopogtatást 50 cm élhosszúságú, négyzethálós mentén végezték. Azokon a helyeken, ahol a külső átmérő megváltozik (nyaknál és a csapos végnél), a vizsgálati helyeket sűríteni kellett.

A belső felület állapotát szemrevételezéssel és hibahelyek méretének meghatározásával kellett ellenőrizni.

A beépítésre vonatkozóan is komoly előírások voltak. A csőelemek összehúzása során ellenőrizni kellett, hogy a gumigyűrű a kerület mentén egyenletesen és csúszásmentesen kezd-e gördülni. Ezt követően ellenőrizni kellett, hogy a gumigyűrű egyenlő mélyen helyezkedett-e el a cső illesztés egész keresztmetszetében, továbbá hogy a gumigyűrű kinyomódását meggátló gyűrűvállal érintkezik-e. Amennyiben az előírttól eltérő gumigyűrű elhelyezkedést tapasztaltak az ellenőrzéskor, akkor az összehúzást meg kellett ismételni. A két csövet nem volt szabad teljesen összehúzni. A két csőelem között legalább az *M.3. ábrán* feltüntetett „c” értékű hézagnak meg kellett lennie.

A csőelemeket úgy kellett elhelyezni, hogy azok sorszáma a későbbi, esetleges megbontás esetén látható legyen.

A csőfektetéssel egy időben rögzíteni kellett a nyilvántartásba (ún. „pallérkönyvbe”) a beépített csőelemek sorszámát, a szabad tokos vég magassági helyzetét, íves vezetékszakszon a kapcsolati szögeltérés mértékét, a kapcsolati gumigyűrű mélységi elhelyezkedését, valamint a kapcsolati ütközési hézag mértékét.

A már lefektetett csővezetékszakszt a belső szennyeződésektől óvni kellett, így a kezdeti pontját állandó jelleggel, míg az aktuálisan építés alatt levő részén a munkavégzési időn kívül ideiglenesen le kellett zárni.

Beépítést követően, a kész vezetékek megfelelőségét nyomáspróbával kellett igazolni. Mivel a gumigyűrűs tömítésű csőkapcsolatok hosszirányú erőket nem tudnak fölvenni, így minimális elmozdulás is a csőkapcsolatok vízzárósági hibáját eredményezhetné. Ennek megfelelően a nyomáspróba előtt ellenőrizni kellett az iránytörések, elágazások, lezárások környezetében a kitámasztásokat, illetve lehorgonyzásokat. Ezt követően a munkaárkot a cső válláig megfelelő, kétoldalt egyidejűleg végzett tömörítéssel vissza kellett tölteni, hogy ezzel meggátolják a csövek kivetődését, elmozdulását.

A nyomáspróba során a vezetéket ivóvíz-hálózati vízzel kellett feltölteni. A vezetékek teljes feltöltése után 24 órával kezdődött meg a vizsgálat. 2 óránként 3 bar-ral növelték a vezetékekben levő nyomást. A vizsgálati nyomás eléréséhez szükséges végső 1-2 bar nyomásnövelést 1 órán belül létre lehetett hozni. A vizsgálat minősítési időtartama 3 óra volt, amely alatt mérni kellett a vizsgálati nyomás azonos szinten tartásához szükséges utántáplált vízmennyiséget. A nyomáspróbán akkor felelt meg a vezetékek, ha az 1 órán keresztül utántáplált vízmennyiség nem haladta meg a $q=0,005 \text{ liter/m}^2/\text{óra}$ fajlagos mennyiséget, ami 1 km hosszú vezetékszakszra nézve $Q=0,016 D \times L$ (ahol: Q a vízmennyiség [liter/óra], D a névleges belső átmérő [mm], L a vezetékek hossza [km]) [Mester, 1978].

A nyomáspróbát követően a vízvezetéket erős vízárammal át kellett öblíteni, majd 24 órás behatással klórral kellett fertőtleníteni. A leöntésnél az öblítő víz szabad klórmaradékának 10 mg/liternek kellett lennie. Fertőtlenítés után az ivóvízvezetéket

újából ki kellett öblíteni, míg a klóros víz teljesen el nem távozott a vezetékből. Csak ezt követően történt meg az üzemi átvétel.

Tehát a beépítéskor is ellenőrizték a vezetékek vízzáróságát és az illesztések megfelelőségét. Ez nem csak a hálózati veszteségek minimalizálása szempontjából lehet fontos, hanem a cső külső felületét érő víz összetétele szempontjából is.

Ezek alapján megállapítható, hogy ha a Műszaki Előírásban leírtak szerint jártak el, akkor több szintű ellenőrzést végeztek a Sentab csövek kapcsán, mellyel igyekeznek minimalizálni a gyártási, illetve beépítési hibákat.

M.1.4. melléklet: Sentab csövek korrózióvédelme

Amint azt már korábban írtam, S54 jelű cementet használtak a Sentab csövek készítéséhez. Erre hivatkozva a Műszaki Előírás [Mester, 1978] nem ír elő külön korrózióvédelmet.

A csövek beépítése kapcsán a következő feltételeket írja elő, a megfelelő korrózióállóság biztosításához [Mester, 1978]:

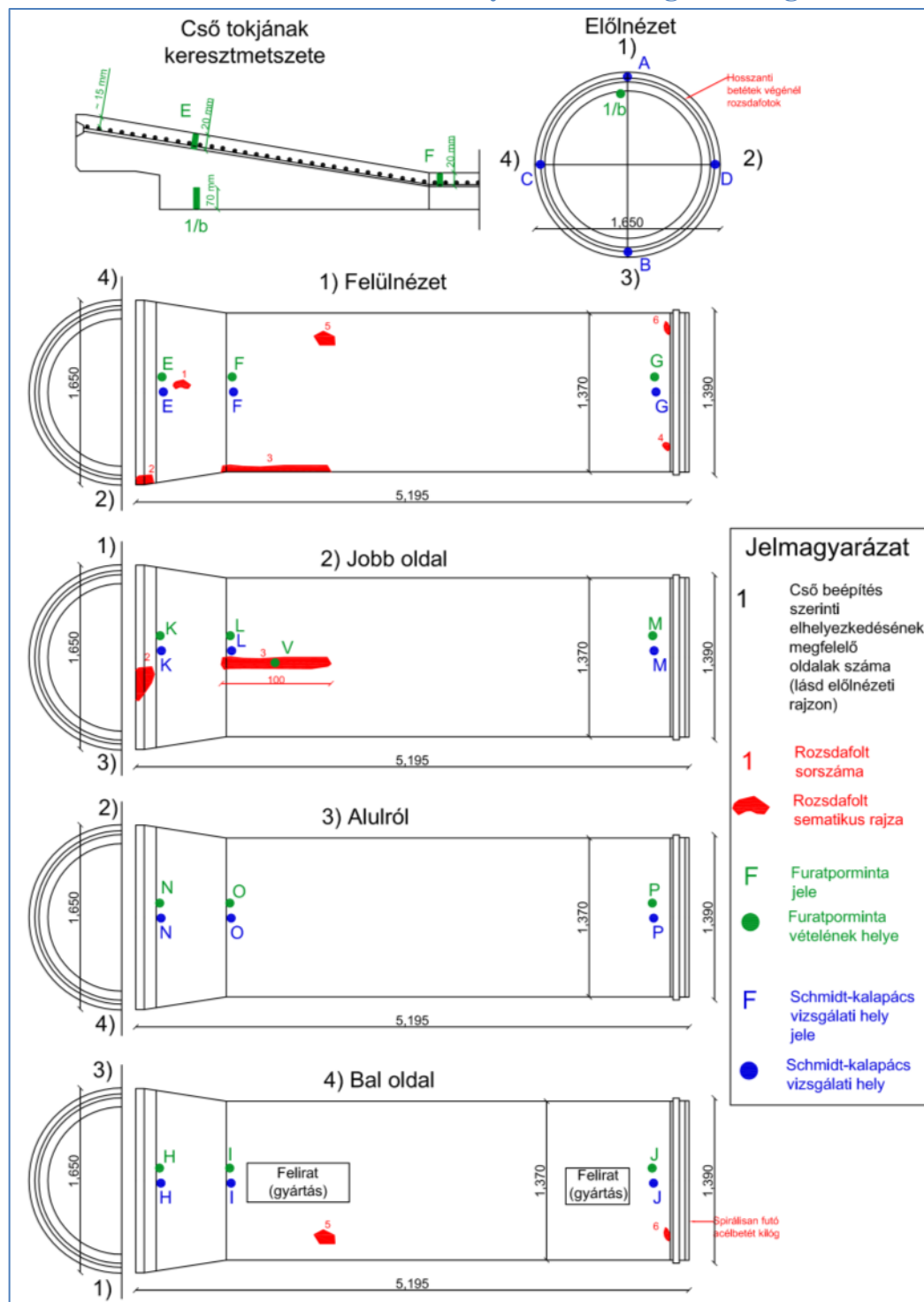
- a talajvíz szulfátion tartalma 0-4000 mg/l (SO_4),
- a talaj vízdoldható szulfátion tartalma 0-6000 mg/kg (SO_4),
- a csövek feleljenek meg a Műszaki Előírás minden feltételének,
- a csövek felülete ne legyen táskás,
- ne legyen kóboráram.

Ha az előbb említett feltételek valamelyike nem teljesült, akkor a tervezőnek külön kellett gondoskodnia a megfelelő korrózióvédelemről.

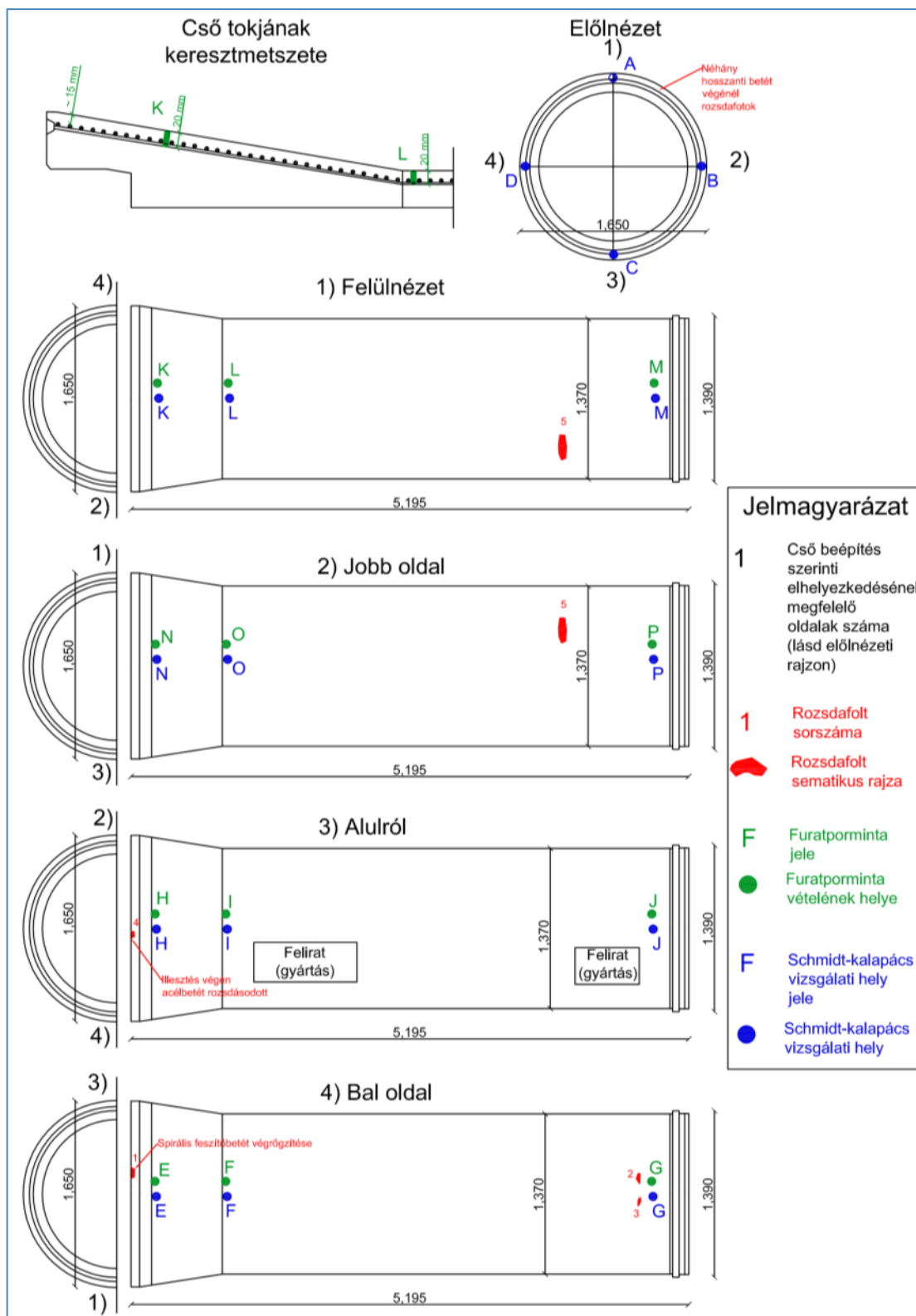
Azokon a helyeken, ahol a Műszaki Előírás követelményeit nem teljesítette, „a gyártó olyan javítási eljárásokat alkalmazhat, amelyek igazolt módon egyenértékűvé teszik a javítást nem kívánó csövekkel” [Mester, 1978].

A helyszíni vizsgálati tapasztalataink alapján a szükséges javításokat epoxigyanta tartalmú javítóanyaggal végezték el.

M.2. melléklet: Csöveken észlelt hibahelyek és az elvégzett vizsgálatok helyei



M.11. ábra: I. számú csövön észlelt rozsdafoltok és vizsgálati helyek vázrajza
(Méréseket végeztük: 2013. 07. 17. és 2013. 07. 22. között)



M.12. ábra: II. számú csővön észlelt rozsdafoltok és vizsgálati helyek vázrajza (Méréseket végeztük: 2013. 07. 17. és 2013. 07. 22. között)

M.3. melléklet: Szemrevételezéskor tapasztalt rozsdafoltok a csövek felületén

M.3.1. melléklet: Bütüs felületen tapasztalt rozsdafolt

Ahogy az *M.13. ábrán* látható, a hosszbetétek végeinél rozsdafoltokat figyeltünk meg a vizsgált csőelemen. Az *M.13. ábrán* jól látható, hogy az 5 mm átmérőjű feszítőbetét környezetében hozzávetőlegesen 4×4 cm kiterjedésű rozsdafolt alakult ki. A *3.1. ábráról* pedig leolvasható ugyanennek a rozsdafoltnak a harmadik irányú (magassági) kiterjedése (15,1 mm) is.



M.13. ábra: Sentab cső bütüs felületén észlelt rozsdafoltok (Kép készült: 2013. 07. 17.)

A legtöbb megvizsgált cső esetén tapasztaltuk a hosszbetétek végeinek rozsdásodását. Feltehetően ez a nem megfelelő gyártástechnológia, illetve annak nem megfelelő alkalmazása miatt alakult ki.

M.3.2. melléklet: Zsaluillesztés környezetében tapasztalt rozsdafoltok

A vizsgált csövek közül többön megfigyeltük a zsaluillesztések környezetében rozsdafoltokat.



M.14. ábra: Zsaluillesztésnél észlelt rozsdafolt üzem alatti csövön (Kép készült: 2013. 04. 25.)

Az *M.14. ábrán* egy üzem alatti csövön felmért rozsdafoltok láthatók. A rozsdafoltok mérete 2×1,5 cm és 4×6 cm volt. A rozsdafoltok környezetében a beton

felületén szemmel látható bedolgozási hibát, betonstruktúra eltérést nem észleltünk. Mivel a cső üzem alatt volt, így az adatfelvételt követően nem volt lehetőség a hibahely roncsolásos (betonfedés megbontásával való) vizsgálatára.



M.15. ábra: Zsaluillesztésnél észlelt rozsdafolt üzemén kívüli csövön (Kép készült: 2013. 07. 17.)

Az M.15. ábrán hozzávetőlegesen 100×10 cm kiterjedésű felületen lehet több apró rozsdafoltot megfigyelni a zsaluillesztés környezetében. A rozsdatermék (beton felületéből kiálló) magassági mérete helyenként elérte a 32,8 mm-t. A rozsdatermék a beton felületén a talajjal összefüggő egységet képezett (M.16. ábra).



M.16. ábra: Zsaluillesztésnél észlelt talajjal keveredett rozsdatermék (Kép készült: 2013. 07. 17.)

Mivel ez a cső üzemén kívül volt, így a betonfedés eltávolításával lehetőségünk volt a hibahely részletesebb elemzésére. (Ezzel a rozsdafolttal kapcsolatos további eredményeimet a kloridion okozta korrózió kapcsán ismertetem.)

M.3.3. melléklet: Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzásánál jelentkező rozsdafoltok

A Sentab csövek gyártástechnológiájának ismertetése kapcsán már említettem, hogy több csövön is megfigyelhető volt a cső tokjának végéhez közel a cső palástján egy jellegzetes rozsdafolt (M.17. ábra). A szemrevételezés alapján a betonfelület a rozsdafolt környezetében ép volt, azon mechanikus sérülésnek, bedolgozási hibának nem volt jele.



M.17. ábra: Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzásának hibája (Bal oldali kép készült: 2012. 07. 02., jobb oldali kép készült: 2010. 11. 04.)

A hiba okának beazonosítását az üzemén kívüli csöveken végzett feltárások segítségével tudtuk elvégezni. A rozsdafolt jellegzetes megjelenése miatt az üzem alatti csövek esetén is nagy bizonyossággal lehet ezek okát valószínűsíteni.

M.3.4. melléklet: Cső palástján észlelt rozsdafoltok

Az egyik vizsgált csövön, a csőszár végéhez közel hosszanti rozsdafoltot figyeltünk meg (M.18. ábrán). (Az M.18. ábrán látható rozsdafolt megegyezik az M.13. ábrán feltüntetett 2. számú rozsdafolttal.)

A rozsdafolt környezetében jól látható, hogy a beton felülete porózus, mely feltehetően bedolgozási hibára vezethető vissza. A rozsdásodás pontos okát későbbiekben a betonfedés megbontásával is vizsgáltuk.



M.18. ábra: A csőszár végének közelében észlelt hosszanti rozsdafolt (Képek készültek: 2013. 07. 22.)

Másik cső vizsgálata során észleltünk a beton felületén egy hozzávetőlegesen 5×4 cm kiterjedésű rozsdafoltot (M.19. ábra). A rozsdatermék eltávolítását követően két

nagyméretű pórust figyeltünk meg, mely feltehetően a feszítőhuzalokig terjedő pórusrendszerrel van összeköttetésben. Feltehetően ez is a nem megfelelő bedolgozásra vezethető vissza.



M.19. ábra: Beton felületén észlelt, hozzávetőlegesen 5×4 cm kiterjedésű rozsdafolt a felmérés kezdetén és a rozsdatermék eltávolítását követően, képek készültek: 2013. 07. 17.)

Az előzőhöz hasonló rozsdafoltot figyeltünk meg egy másik csövön is, melyen a rozsdatermék eltávolítását követően egy nagyméretű pórust tapasztaltunk, mely feltehetően a feszítőhuzalokig terjedő pórusrendszerrel van összeköttetésben (M.20. ábra). Feltehetően ez is a nem megfelelő bedolgozásra vezethető vissza. (Az M.20. ábrán szereplő rozsdafolt elhelyezkedését az M.11. ábrán 5 számmal jelöltem.)



M.20. ábra: Beton felületén észlelt rozsdafolt a rozsdatermék eltávolítását követően, kép készült: 2013. 07. 17.)

Az egyik csövön megfigyeltünk a tok végének közelében egy hozzávetőlegesen 4×10 cm kiterjedésű rozsdafoltot, melynek alakja eltért a spirálisan futó feszítőhuzalok véglehorgonyzásánál megfigyelt rozsdafolttól. A rozsdaterméket eltávolítottuk, így alatta egy repedést figyeltünk meg (M.21. ábra).



M.21. ábra: A tok végének közelében megfigyelt rozsdafolt a szemrevételezés elején és a rozsdatermék eltávolítását követően (Képek készültek: 2013. 07. 18.)

M.3. táblázatban közölt adatok az M.11. ábrán feltüntetett mérési helyekhez tartoznak.

[illegible][illegible]

M.4. táblázatban közölt adatok az M.12. ábrán feltüntetett mérési helyekhez tartoznak.

M.4. táblázat: Az II. számú csövön végzett Schmidt-kalapácsos mérések eredményei

Egyedi vizsgálatok	Mérési helyek													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	Útes iránya													
	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒	⇒
1	62	60	62	66	60	60	63	61	62	64	58	60	58	60
2	62	61	61	64	62	60	62	60	61	62	59	58	58	58
3	60	60	62	64	62	60	60	62	60	63	59	60	58	60
4	59	63	64	64	61	62	66	58	64	64	54	60	60	60
5	64	58	61	64	58	63	60	62	62	62	54	61	60	56
6	62	58	61	62	59	58	60	64	61	58	56	58	60	58
7	62	62	62	66	60	64	60	62	62	62	56	65	60	62
8	62	62	64	65	60	59	62	62	60	62	55	63	59	60
9	64	64	66	61	60	59	61	60	58	64	57	60	62	56
10	58	62	60	60	60	66	60	60	63	65	58	58	60	59
11	60	61	64	62	60	62	56	64	60	62	56	62	61	59
12	60	62	66	64	58	62	60	64	62	63	60	60	61	60
r_s átlag	61,3	61,1	62,8	63,5	60,0	61,3	60,83	61,58	61,25	62,58	56,83	60,42	59,75	58,33
Útes irány korrekció	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,70
r_0 korrigált átlag	61,3	61,1	62,8	63,5	60,0	61,3	60,83	61,58	61,25	62,58	56,83	60,42	59,75	62,03
$r_{k,0}$ műszer korrekció	60,1	60,0	61,6	62,3	58,9	60,1	59,7	60,4	60,1	61,4	55,8	59,3	58,7	60,9
$r_{k,0}$ korrigált karbonátosodás	51,1	51,0	52,4	53,0	50,1	51,1	50,8	51,4	51,1	52,2	47,4	50,4	49,9	51,8
csövön elvégzett vizsgálatok átlagától való eltérés	0,2	0,1	1,4	2,1	-0,9	0,2	-0,2	0,5	0,2	1,3	-3,5	-0,5	-1,1	0,8

csövön elvégzett vizsgálatok átlaga	50,9
szórás	1,2
átlagos abszolút eltérés	0,8

M.5. melléklet: Vizsgált furatpor minták kloridion-tartalma és pH értéke*M.5. táblázat: Az I. számú csőből vett furatpor minta kloridion-tartalma és pH értéke*

Mintavétel helye	Minta jele	pH	Kloridion-tartalom, m%	
			betonra vonatkoztatva	cementre vonatkozó érték
1. oldal (Cső beépítés szerinti felső oldala)	I/E/1	12,3	0,07	~0,3
	I/E/2	12,3	0,05	~0,2 - 0,3
	I/F/1	12,3	0,03	~0,2
	I/F/2	12,4	0,04	~0,2
	I/G/1	12,2	0,07	~0,3
	I/G/2	12,3	0,07	~0,3
4. oldal (Cső beépítés szerinti bal oldala)	I/H/1	12,3	0,05	~0,2 - 0,3
	I/H/2	12,3	0,04	~0,2
	I/I/1	12,2	0,04	~0,2
	I/I/2	12	0,03	~0,1
	I/J/1	12,3	0,03	~0,1
	I/J/2	12,3	0,02	~0,1
2. oldal (Cső beépítés szerinti jobb oldala)	I/K/1	12,1	0,04	~0,2
	I/K/2	12,2	0,06	~0,3
	I/L/1	12	0,04	~0,2
	I/L/2	12,2	0,01	<0,1
	I/M/1	12,2	0,04	~0,2
	I/M/2	12,3	0,04	~0,2
3. oldal (Cső beépítés szerinti alsó oldala)	I/N/1	12,3	0,02	~0,1
	I/N/2	12,4	0,01	<0,1
	I/O/1	12,2	0,02	~0,1
	I/O/2	12,4	0,01	~0,1
	I/P/1	12,3	0,01	<0,1
	I/P/2	12,3	<0,01,	~0
Jobb oldal 3. rozsdafolt	I/V/1	11,9	0,47	~2,1
	I/V/2	11,7	0,47	~2,1
Cső belső oldaláról vett minta	1/b/1	12,2	0,01	<0,1
	1/b/2	12,3	<0,01	<0,1
	1/b/3	12,3	0,01	<0,1
	1/b/4	12,3	0,01	<0,1

M.6. táblázat: Az II. számú csőből vett furatpor minta kloridion-tartalma és pH értéke

Mintavétel helye	Minta jele	pH	Kloridion-tartalom, m%	
			betonra vonatkoztatva	cementre vonatkozó érték
4. oldal (Cső beépítés szerinti bal oldala)	II/E/1	12,2	0,01	<0,1
	II/E/2	12,3	0,01	<0,1
	II/F/1	12,2	<0,01	~0
	II/F/2	12,3	0,01	<0,1
	II/G/1	12,1	0,01	<0,1
	II/G/2	12,2	0,01	<0,1
3. oldal (Cső beépítés szerinti alsó oldala)	II/H/1	12,3	0,01	<0,1
	II/H/2	12,4	0,01	<0,1
	II/I1	12,3	<0,01	~0
	II/I/2	12,2	<0,01	~0
	II/J/1	12,3	<0,01	~0
	II/J/2	12,4	<0,01	~0
1. oldal (Cső beépítés szerinti felső oldala)	II/K/1	12,2	0,01	<0,1
	II/K/2	12,4	<0,01	<0,1
	II/L/1	12,3	<0,01	~0
	II/L/2	12,4	<0,01	~0
	II/M/1	12,3	<0,01	~0
	II/M/2	12,3	<0,01	~0
2. oldal (Cső beépítés szerinti jobb oldala)	II/N/1	12,3	0,01	<0,1
	II/N/2	12,4	0,01	<0,1
	II/O/1	12,2	0,02	<0,1
	II/O/2	12,4	0,02	<0,1
	II/P/1	12,1	0,01	<0,1
	II/P/2	12,3	0,01	<0,1

A táblázatban feltüntetett vizsgálati eredményeknél a betű jelöli a mintavétel helyét, míg a „per” jel utáni szám a mintavétel mélységét jelenti. A Mintavételi helyek az M.11. ábrán, illetve az M.12. ábrán látható.

M.6. melléklet: Betonfedés megbontása alapján tapasztalt hibaokok

Az üzemén kívüli, kivett csődarabokon feltárásokat végeztünk, hogy a hibák körülményeit minél alaposabban tudjuk tanulmányozni.

A könnyebb áttekinthetőség érdekében, a szemrevételezéshez hasonló csoportosításban ismertetem a feltárás során nyert információimat.

M.6.1. melléklet: Bütös felületen tapasztalt rozsdafolt feltárása

A II. számú cső bütös felületén tapasztalt rozsdafoltok (M.22. ábra) környezetében a betonfedést eltávolítottuk.



M.22. ábra: II. számú cső bütös felületén tapasztalt rozsdafoltok (Kép készült: 2013. 07. 22.)

Az M.23. ábrán megfigyelhető, hogy a hosszanti feszítőbetétek majdnem a beton felületéig tartottak. A gyártástechnológiai leírással ellentétben a hosszbetétek kiértek a bütös felületig. Végének kiegészítését és epoxigyantával való lezárását nem tapasztaltam a csövön. Annak figyelembevételével, hogy a cső gyártási éve 1974 volt és a Műszaki Előírást [Mester, 1978] 1978-ban adták ki, elképzelhetőnek tartjuk, hogy a hosszbetétek végének korrózióvédelmére ezt az eljárást a vizsgált cső gyártását követően alkalmazták.



M.23. ábra: II. számú cső bütös felületénél elvégzett feltárás (Képek készültek: 2013. 07. 22.)

A feltárás környezetében, a cső palástján nem észleltünk rozsdafoltot. Azonban a betonfedés eltávolítását követően a tokvégnél a spirálisan elhelyezkedő feszítőhuzal korrózióját tapasztaltuk. (A megbontott felületen megvizsgáltuk a karbonátosodási mélységet, mely nem érte el a feszítőhuzalokat.) Tehát a feszítőbetét korróziója nem az alacsony pH értéknek köszönhetően következett be.

M.6.2. melléklet: Zsaluillesztés környezetében tapasztalt rozsdafolt feltárása

Az I. számú cső zsaluillesztésénél észlelt nagy kiterjedésű rozsdásodás környezetében a betonfedést eltávolítottuk (M.24. ábra). A rozsdafoltnál megbecsültük a keresztmetszet csökkenésének mértékét. A rozsdafolt vonalában, a cső alkotója mentén, teljes hosszban eltávolítottuk a betonfedést, majd meghatároztuk a betonfedés értékét. Az M.29. ábrán együtt ábrázoltam a feszítőbetétek betonfedését és a becsült keresztmetszetfogyást. Ez alapján egyértelműen látható, hogy a korrózió azon a részen alakult ki, ahol a betonfedés lecsökkent.

A zsaluillesztés környezetében több helyen megtaláltam a betonfelület alatt hozzávetőlegesen 1 cm-rel a tömítő szalagot. Ez arra enged következtetni, hogy a tömítő szalag és a zsaluzat közé bejutott a beton. Tehát a tömítő szalag nem látta el megfelelően a feladatát, így elképzelhető, hogy a zsaluillesztésen a cementpép kifolyt a tömörítés hatására.



M.24. ábra: I. számú cső zsaluillesztésénél észlelt hibahely feltárása (Kép készült: 2013. 07. 18.)

M.6.3. melléklet: Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzásánál jelentkező rozsdafolt feltárása

Az M.17. ábra jobb oldali képén látható rozsdafolt környezetét feltártam. A lehorgonyzó elem és a környezetében levő feszítőhuzal elkezdett korrodálni (M.25. ábra).

Az M.25. ábra bal oldali képen megfigyelhető, hogy elsősorban a cső bütüs felületéhez közelebbi része károsodott a lehorgonyzó elemnek. Ebből arra következtetnek, hogy a bütüs felület irányából kezdődött meg a lehorgonyzó elem korróziója.

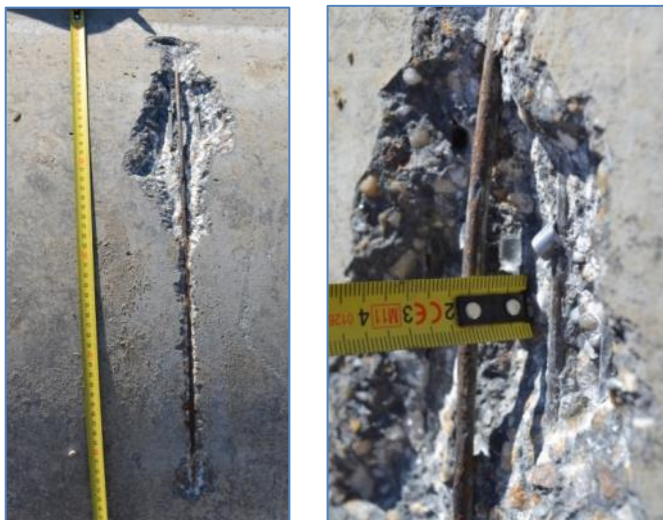


M.25. ábra: Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzása (Képek készültek: 2010. 11. 04.)

A friss törési felületen ellenőriztük, hogy a karbonátosodási mélység nem érte el a feszítőbetétet. Feltehetően a betonba bejutott kloridion hatására kezdődött meg a lehorgonyzó elem korróziója.

M.6.4. melléklet: Cső palástján észlelt rozsdafoltok

A II. számú cső szárvégénél észlelt hosszanti rozsdafolt (M.18. ábra) környezetét feltártuk. A feltárás során megfigyeltük, hogy a spirálisan futó feszítőhuzal egy ponton nem volt befűzve a spirálhuzal-rendező lécebe (M.26. ábra). Ennek következtében a feszítőhuzal elmozdult. Lokálisan a feszítőbetét betonfedése lecsökkent. Az előírt 12 mm helyett a betonfedés 3,5 mm volt, illetve a betonfelület porózus volt. A lecsökkent betonfedéssel rendelkező részen a spirálisan futó feszítőhuzal korrózióját figyeltük meg.



M.26. ábra: II. számú cső szárvégénél tapasztalt hosszanti rozsdafolt feltárása (Képek készültek: 2013. 07. 22.)

A spirálisan futó feszítőhuzal szomszédos meneteinél, ahol a spirálhuzal-rendező lécebe be volt fűzve a feszítőhuzal (biztosított volt az előírt betonfedés) az acélbetétek teljesen épek voltak. Tehát az észlelt hibának lokális jellegű elváltozás volt az elsődleges oka.

Az *M.19. ábrán* ismertetett rozsdafolt környezetét feltártuk. A feltárás során azt tapasztaltuk, hogy egy ponton a spirálisan futó feszítőbetét keresztmetszete teljes egészében megszűnt. Az *M.27. ábrán* látható, hogy a spirálisan futó feszítőhuzal az 1. számú feszítőbetét helynél hozzávetőlegesen 7%-ban károsodott, míg a 2. számú helyen 20%-ban, a 3. számú helyen 100%-ban, a 4. helyen 15%-ban, míg az 5. számú és 6. számú helyeken a feszítőbetét teljesen ép volt. A karbonátosodási mélység nem érte el a spirálisan futó feszítőhuzalokat. Feltehetően az *M.19. ábrán* látható jelentős méretű pórusokon keresztül a kloridion, illetve a víz és oxigén bejutott a feszítőhuzalig, és annak lokális korrózióját okozta.



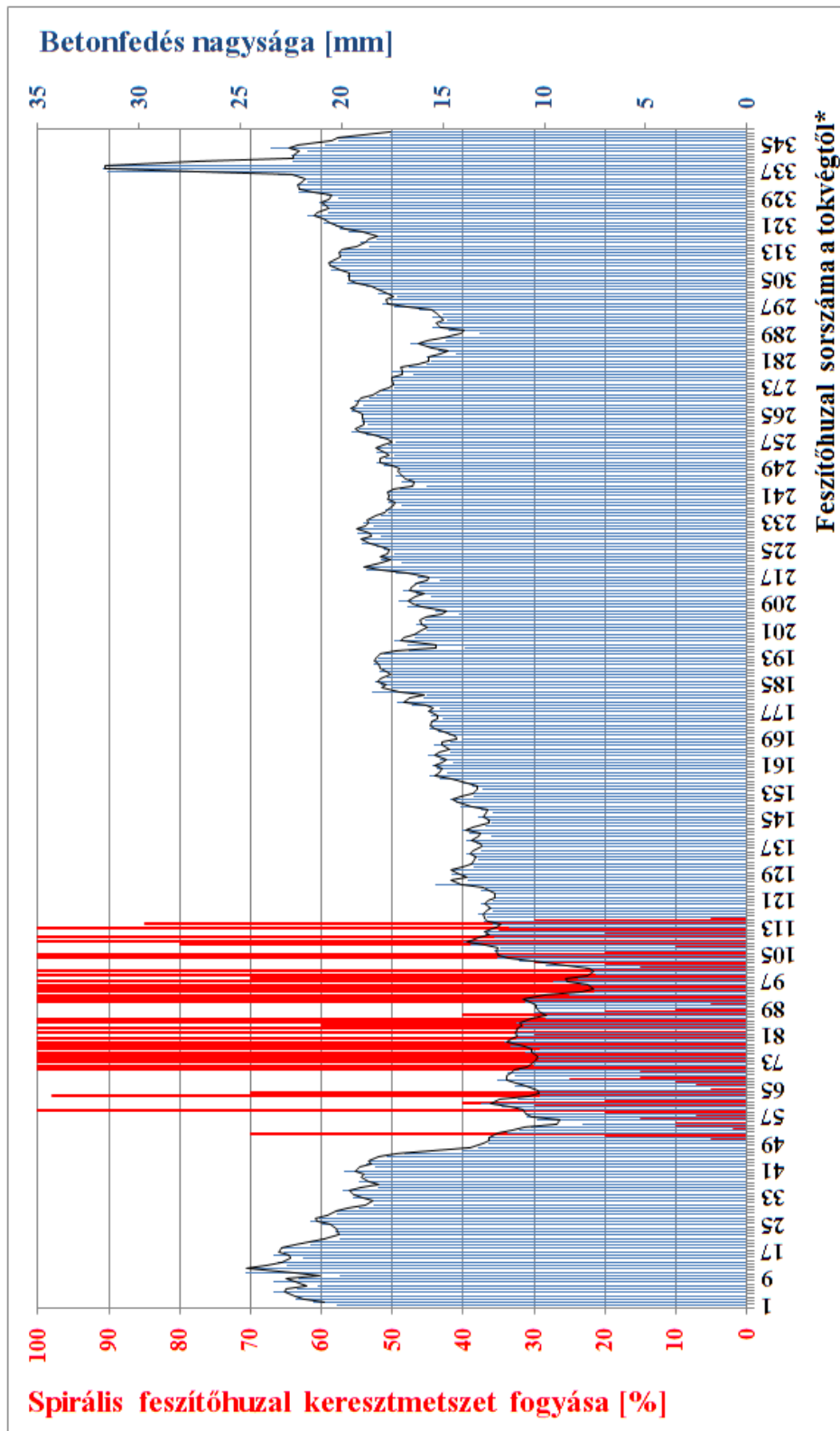
M.27. ábra: Hozzávetőlegesen 4×5 cm kiterjedésű rozsdafolt feltárása (Kép készült: 2013. 07. 22.)

Az *M.21. ábrán* látható rozsdafoltnál a rozsdatermék eltávolítását követően megfigyelt repedés környezetét feltártuk. Azt tapasztaltuk, hogy a repedés alatt a spirálisan futó feszítőhuzal sűrűn volt feltekercselve (*M.28. ábra*). (Nem volt mérhető távolság a spirálisan futó feszítőhuzal egymást követő 4 menete között.) Továbbá a feltáráskor megfigyeltük, hogy a бүтүс felületen a hosszanti acélbetét vége jelentősen korrodálódott.



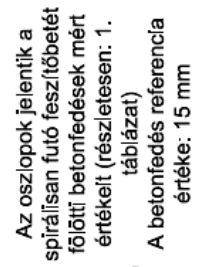
M.28. ábra: Rozsdatermék alatt talált repedés környezetének feltárása (Képek készültek: 2013. 07. 18.)

M.7. melléklet: Betonfedés nagysága



* A Sentab csövekben egy darab spirális futó fessítőhuzal található, melynek tengelytávolsága az alkotó mentén hozzávetőlegesen 15 mm. A „fessítőhuzal sorszáma” megadja, hogy a spirálisan futó fessítőbetét hányadik mérési pontjának adatairól van szó a tokvégtől nézve az alkotó mentén.

M.29. ábra: I. számú cső spirális fessítőbetétének betonfedése a zsaluillesztés környezetében és a becsült keresztmetszetfogyás százalékban. (Mérést végeztük: 2013. 07. 18.)

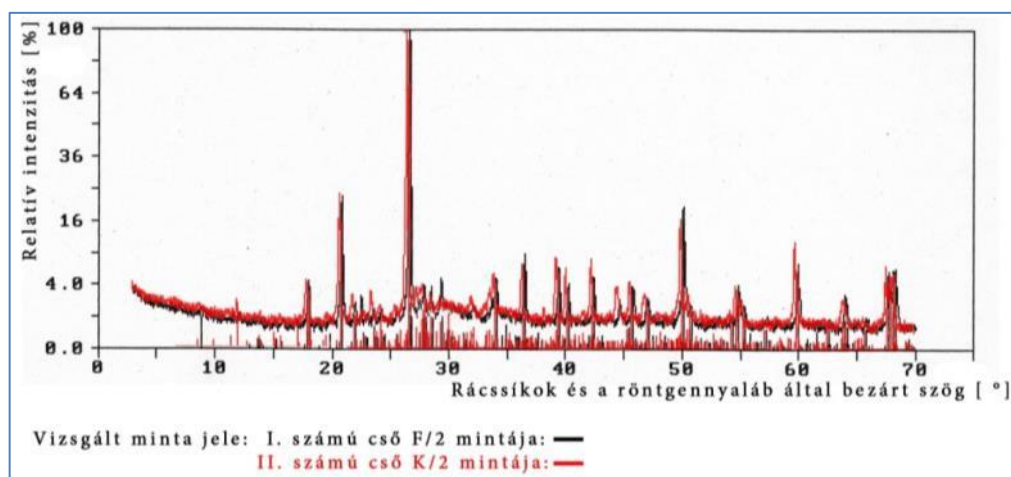


115 / 119 oldal

M.8. melléklet: Furatpor minták elemzése fázisanalitikai módszerrel

M.8.1. melléklet: Röntgendiffrakciós vizsgálat

A két minta röntgendiffraktogramjait közös koordináta-rendszerben ábrázoltam (M.31. ábra). Az ábrán megfigyelhető, hogy a két vizsgált minta közel azonos eredményt adott. A legnagyobb kiugró érték mind a két mintánál a kvarc volt, mely igazolja, hogy mind a két csőhöz kvarc adalékanyagot használtak, ahogy az a gyártástechnológiában is olvasható.



M.31. ábra: Az I. és II. cső mintáinak röntgendiffraktogramja

A röntgendiffraktogramokon azonosított elemeket az M.7. táblázatban, illetve az M.8. táblázatban foglaltuk össze. A kvarcon kívül (SiO_2) mindkét mintában kimutatható volt még portlandit (Ca(OH)_2), kalcit (CaCO_3), illetve földpát (albit és anortit, Ca- és Na-tartalmú aluminát-szilikát), amelyek jelenléte részben az adalékanyag, részben a cement felhasználásával magyarázható.

M.7. táblázat: I. számú csőben kimutatott alkotóelemek

Score list: I. számú Sentab cső							
=====							
s			PC-APD, Diffraction software				
DI file name: KK3352.DI							
Score	Rel. Score	I	Disp	RP-file	G Name	Formula	
		%	[μm]				
14.71	0.82	145	-57	QUARTZ	1 ALPHA QUARTZ	SiO2	*
3.82	0.35	4	-69	40733	1 Portlandite, syn	Ca(OH)2	*
3.07	0.03	1	-64	200528	1 Anorthite, sodian, ord	(Ca, Na) (Al, Si)2Si2O8	*
2.60	0.04	1	-85	411480	1 Albite, calcian, order	(Na, Ca) Al (Si, Al)3O8	*
1.31	0.07	1	-23	CALCITE	1 CALCITE	CaCO3	*
1.06	0.13	0	-90	220346	3 IronHydroxide	Fe(OH)3	*
1.01	0.03	1	-90	300226	2 Brownmillerite, syn	Ca2(Al, Fe)2O5	*

Voltak olyan alkotóelemek is, amelyeket csak az egyik mintában lehetett kimutatni. Például az I/F/2 mintában vashidroxid (Fe(OH)_3) és brownmillerit volt, míg a II/K/2 mintában rosenhahnit (hidratált cementklinker, kalcium-szilikát-hidrát) és muszkovit (csillám-féle).

M.8. táblázat: II. számú csőben kimutatott alkotóelemek

Score list: II. számú Sentab cső							
=====							
s		PC-APD, Diffraction software					
DI file name: KK3353.DI							
Score	Rel. Score	I %	Disp [μm]	RP-file	G Name	Formula	

10.61	0.59	69	-152	QUARTZ	1 ALPHA QUARTZ	SiO2	*
5.47	0.50	4	-185	40733	1 Portlandite, syn	Ca(OH)2	*
2.93	0.05	2	-152	411480	1 Albite, calcian, order	(Na, Ca)Al(Si, Al)3O8	*
2.68	0.03	1	-185	290378	2 Rosenhahnite	Ca3(Si3O8(OH)2)	*
1.64	0.02	1	-111	250532	3 Pentahydrate, syn	MgSO4·5H2O	*
1.23	0.06	1	-152	CALCITE	1 CALCITE	CaCO3	*
1.21	0.03	0	-111	340175	1 Muscovite-2M2	(K, Na)Al2(Si, Al)4O10	*

A vashidroxid kimutathatósága azt jelenti, hogy az I/F/2 mintavételi helyen (a rosszabb állapotú csővön) korróziós termék volt. A brownmillerit (tetrakalcium-aluminát-ferrit, szilikátkémiai képlettel: C₄AF) kimutathatósága arra utal, hogy a furatpor mintában hidratálatlan vastartalmú kalcium-aluminát-hidrát van, ami lehetséges, ugyanis a brownmillerit hidratációja jóval lassabb (akár évtizedekig is eltarthat), mint a trikálcium-alumináté (szilikátkémiai képlettel: C₃A). A brownmillerit a szulfátálló cementekben van jelen nagyobb arányban (pl. a korábbi cementjelöléseknek megfelelően az ún. S54-es cementben).

A rosenhahnit kristályos trikálcium-szilikát-hidrát, a trikálcium-szilikát (szilikátkémiai képlettel: C₃S) egyik hidratációs terméke, szilárdsághordozó fázis. A muszkovit (csillám-féle) a természetes kvarc adalékanyag kísérőásványaként kerülhetett a betonba.

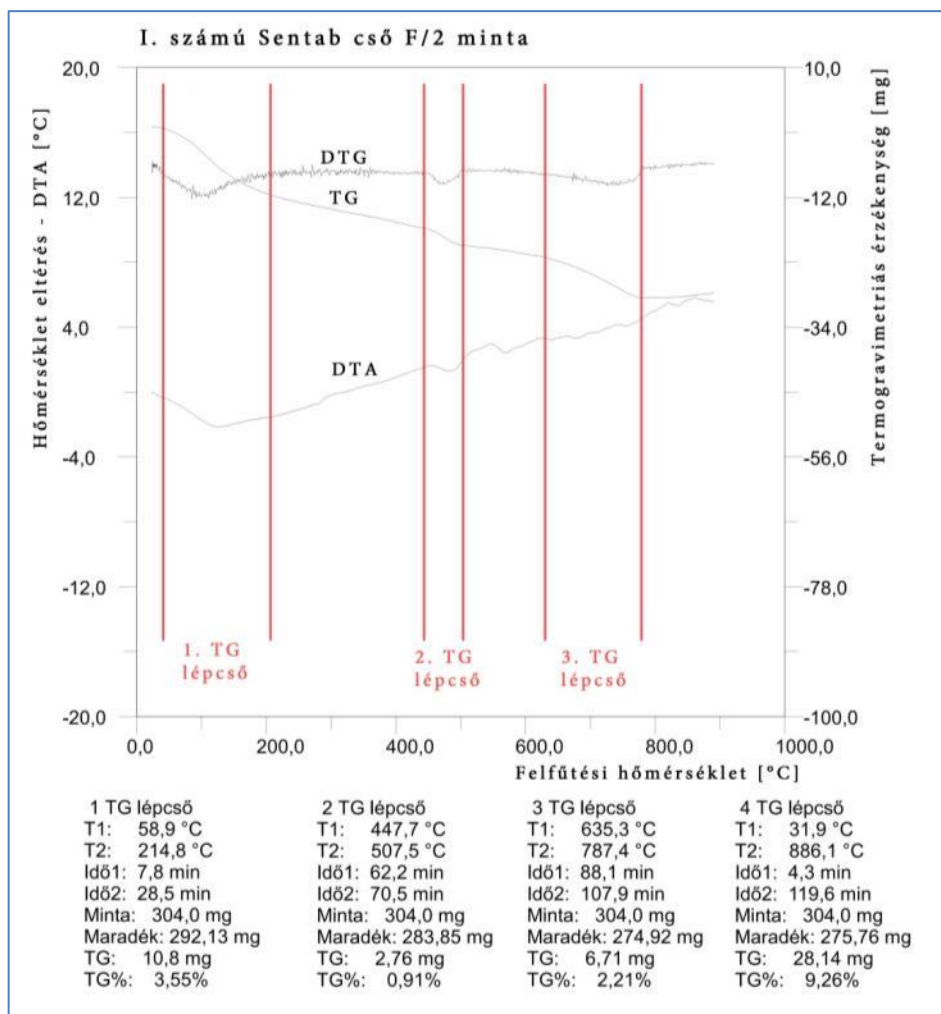
A két cső gyártása között közel egy év telt el, így a beszerzett anyagok összetétele kismértékben megváltozhatott. Ez magyarázhatja a tapasztalt eltéréseket. (Például valószínűsíthető, hogy a „dunai kavics és homok” másik rétegből származott a két cső gyártásakor.)

M.8.2. melléklet: Derivatográfias vizsgálat

Derivatográfias vizsgálatot is végeztünk ugyanazon a két mintán. A vizsgálatához felhasznált mintamennyiség mindkét esetben közel 300 mg volt.

A minták elemzésénél az egyes hőmérsékleti tartományokban végbemenő tömegváltozások, illetve az azokhoz tartozó tömegvesztés változásának sebessége és hőmérsékletváltozás sebessége alapján jellemző lépcsőket lehet meghatározni.

Az M.32. ábrán az I/F/2 minta derivatogramja látható. Az I. mintánál az 1. TG lépcsőnél tapasztalható jelentős tömegvesztés dehidratáció miatt következett be. Ebben a tartományban következik be a fizikai víz és az ettringit (kálcium-aluminát-szulfát-hidrát) vízének elvesztése.



M.32. ábra: I/F/2 minta derivatogramja

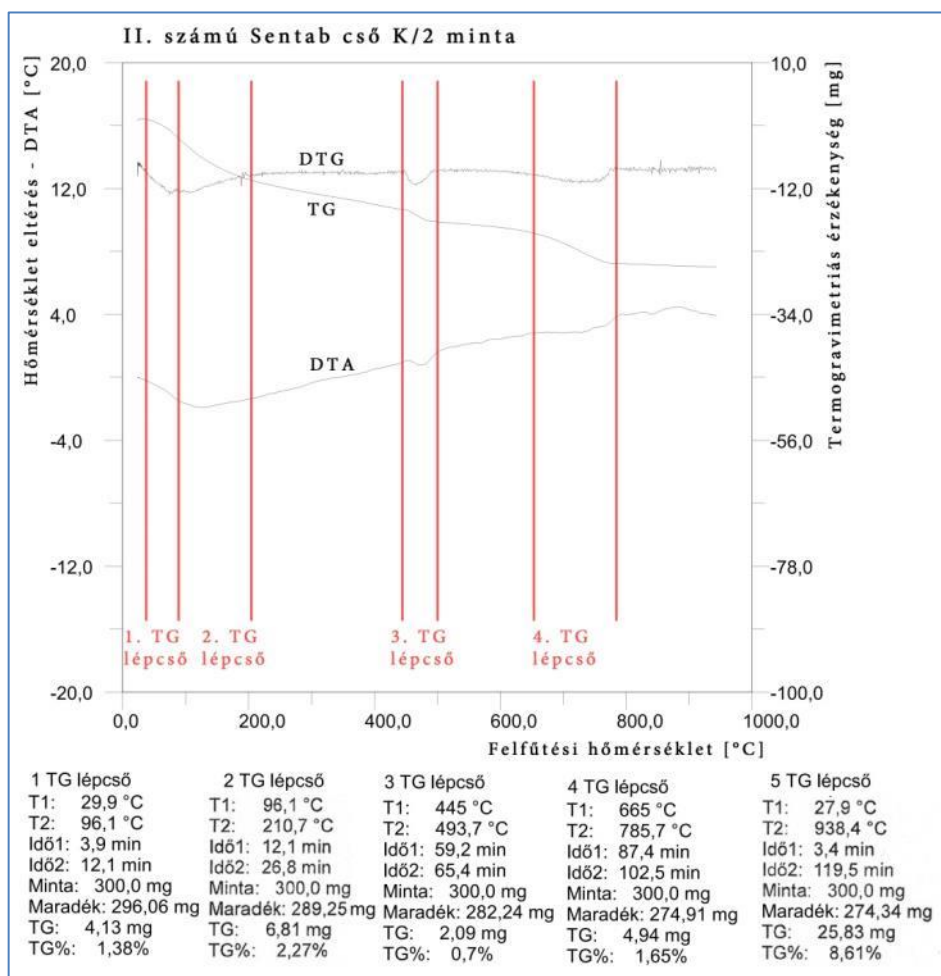
A 2. TG lépcső a portlandit (Ca(OH)_2) hidroxil csoportok formájában, azaz kémiai kötött vízének elvesztését mutatja. A hőreakció során a $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ átalakulás megy végbe, melynél a vízvesztés alapján meg lehet határozni, hogy $0,91 \text{ m\%} \times 4,12 = 3,8 \text{ m\%}$ Ca(OH)_2 volt a mintában.

A 3. TG lépcső a kalcit (kalcium-karbonát, CaCO_3) hőbomlását mutatja, melynek reakcióegyelete: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$. A tömegvesztéséből meg lehet határozni a karbonátosodott cementkőben a kalcit mennyiségét, ami az I/F/2 mintában: $2,21 \text{ m\%} \times 2,27 = 5,0 \text{ m\%}$ volt. (A kalcit a portlandit és a levegő szén-dioxid tartalmának reakcióterméke.)

A 4. TG lépcső megközelítőleg az izzítási veszteséget adja meg, mely a felfűtés során elvesztett teljes tömeget jelenti, ami 9,3 m% volt.

Az M.33. ábrán a II/K/2 minta derivatogramja látható. A II/K/2 mintánál 30°C és 210°C között két termikus lépcsőt lehetett definiálni. Az 1. TG lépcső a fizikai víz és az ettringit vízének elvesztését jelenti, míg a 2. TG lépcső monoszulfát jelenlétére utal, mely az eltérő utókezeléssel, tárolással is magyarázható. A monoszulfát az ettringit

(más néven triszulfát) átalakulásából származó, közel háromszor kevesebb hidrátvizet tartalmazó kalcium-aluminát-szulfát-hidrát.



M.33. ábra: II/K/2 minta derivatogramja

A 3. TG lépcső a kémiaailag kötött víz (portlandit, azaz a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vízének) elvesztését mutatja. A hőreakció során a $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ átalakulás megy végbe, melynél a vízvesztés alapján meg lehet határozni, hogy $0,70 \text{ m\%} \times 4,12 = 2,9 \text{ m\%}$ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ volt a mintában.

A 4. TG lépcső a kalcium-karbonát, azaz a CaCO_3 hőbomlását mutatja, melynek reakcióegyelete: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$. A tömegvesztéséből meg lehet határozni a karbonátosodott cementkő mennyiségét, ami az II/K/2 mintában: $1,65 \text{ m\%} \times 2,27 = 3,8 \text{ m\%}$ volt.

A 5. TG görbe megközelítőleg az izzítási veszteséget adja meg, mely a felfűtés során elvesztett teljes tömeget jelenti, ami 8,6 m% volt.