

**Lehetséges leromlási folyamatok ellenőrzése
Sentab típusú, nagy átmérőjű, feszített
vasbeton nyomócső esetén**



Készítette:

**Czoboly Olivér Attila
(MDYFQT)**

Konzulensek:

**Dr. Balázs L. György,
egyetemi tanár,**

**Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva,
adjunktus,**

**Zimmer Péter,
okl. mérnök, főmunkatárs**

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	4
2. SENTAB CSŐ JELLEMZŐI	7
2.1. Sentab csövek típusai	7
2.2. Sentab csövek gyártástechnológiája	9
2.3. Sentab csövek gyártás során és beépítéskor végzett ellenőrzések	13
2.4. Sentab csövek korrózióvédelme	16
3. FESZÍTETT VASBETON NYOMÓCSÖVEKET ÉRŐ KÖRNYEZETI HATÁSOK	17
4. FESZÍTETT VASBETON NYOMÓCSÖVEK TIPIKUS LEROMLÁSI MÓDJAI	19
4.1. Karbonátosodás okozta acél korrózió	20
4.2. Kloridion-tartalom okozta acélkorrózió	23
4.3. Savas és lágy víz okozta oldódásos betonkorrózió	26
4.4. Szulfátos víz és gáz okozta duzzadási betonkorrózió	27
5. LEHETSÉGES VIZSGÁLATI MÓDOK	28
5.1. Szemrevételezéssel való állapotfelmérés	28
5.2. Betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése	29
5.3. Karbonátosodási mélység ellenőrzése	30
5.4. Kloridion tartalom vizsgálata nedves analitikai módszerrel	30
5.5. Betonfedés megbontásával elvégzendő vizsgálatok	31
5.6. Furatpor minta elemzése fázisanalitikai módszerrel	31
5.6.1. Röntgendiffrakciós vizsgálat	31
5.6.2. Derivatográfias vizsgálat	32
5.7. CT vizsgálat elvégzése és kiértékelése	33
6. SENTAB CSÖVEK VIZSGÁLATI EREDMÉNYEI	33
6.1. Szemrevételezés eredményei	34
6.1.1. Bütös felület szemrevételezése	34
6.1.2. Zsaluillesztés szemrevételezése	35
6.1.3. Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzása	36
6.1.4. Távtartók környezetének vizsgálata	36
6.1.5. Toknyak iránytörésének vizsgálata	37
6.1.6. Cső további részein észlelt rozsdásodások	37
6.1.7. Munkagödör kiemelés miatt keletkezett további sérülések	39
6.1.8. Korábbi javítások környezete	39

6.2. Betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése	41
6.3. Karbonátosodási mélység vizsgálata	41
6.4. Kloridion tartalom vizsgálata nedves analitikai módszerrel	42
6.5. Betonfedés megbontásával elvégzett vizsgálatok	44
6.5.1. Bütös rész feltárása	44
6.5.2. Zsaluillesztés környezetének feltárása	45
6.5.3. Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzása	46
6.5.4. Távtartók környezetének vizsgálata	46
6.5.5. Toknyak iránytörésének vizsgálata	47
6.5.6. Cső további részein észlelt rozsdásodások	47
6.5.7. Feszítőbetét fogyásának vizsgálata	49
6.6. Furatpor minták elemzése fázisanalitikai módszerrel	49
6.6.1. Röntgendiffrakciós vizsgálat	50
6.6.2. Derivatográfiás vizsgálat	51
6.6.3. Furatpor minta fázisanalitikai elemzésének megállapításai	52
6.7. CT vizsgálat eredményei	52
7. JAVASLATOK A KÉSŐBBI ÁLLAPOTVIZSGÁLATOKHOZ	53
8. MEGÁLLAPÍTÁSOK	54
10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	57
11. FELHASZNÁLT IRODALOM	58

A tudományos diákköri munkámhoz 13 oldal melléklet tartozik, mely a vizsgálatokhoz kapcsolódó további ábrákat és táblázatokat tartalmazza.

A címlapon szereplő saját képek egy héjkitörésre tönkrement Sentab típusú csőről, illetve egy üzemen kívüli, kiszedett Sentab típusú csövön észlelt rozsdafoltról készültek.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egy fejlett, illetve egy fejlődő társadalom alap szükséglete a megfelelő közműellátottság. El sem tudjuk képzelni életünket tiszta ivóvíz nélkül.

Jól példázza a nagy ivóvíz igényt, hogy Budapest és vonzáskörzetének ellátásához 2012-ben az ivóvíztermelés 166 826 ezer m³, míg ipari víztermelés 2 250 ezer m³ volt [Fővárosi Vízművek Zrt. 2012]. Ennek megtermeléséhez és szállításához igen komoly vízellátó rendszerre van szükség.

Budapest vonzáskörzetében mintegy 5100 km ivóvíz cső található [Fővárosi Vízművek Kommunikációs osztálya]. A lefektetett csövek anyaga a technológia fejlődésével folyamatosan változott (1.1. táblázat).

1.1. táblázat: Egyes időszakokban beépített csőanyagok [Károlyi, Tolnai, 2008]

Csőanyagok		Első megjelenés		Fektetési időszak (év)																											
Azbesztcement	1933																														
Öntöttvas	1868																														
Acél	1920																														
Gömbgraf. öv.	1971																														
Sentab	1969																														
PVC	1968																														
KPE	1973																														

Amint az 1.1. táblázatban látható, közel 20 évig építettek be Budapest vonzáskörzetében Sentab típusú feszített vasbeton csöveket. Ebben az időszakban Dr. Balázs György könyve [Balázs, 1995] alapján, Budapesten hozzávetőlegesen 120 000 fm, Pócsmegyeren 620 fm, míg Szigetszentmiklóson 9770 fm Sentab cső került elhelyezésre.

Budapesten kívül több településen is beépítésre kerültek Sentab csövek. A Dunántúli Regionális Vízmű Zrt. Mohácsi Üzemvezetőségéhez 32 332 fm teljes szakasz hosszúságú, 1000 mm átmérőjű Sentab cső tartozik [Drescherné, 2004], míg Szegeden hozzávetőlegesen 13 000 fm hosszúságban építettek ki 1000 mm átmérőjű Sentab csövet [sulinet.hu]. Pécs környéki közműhálózat részeként ivóvíz ellátásban 979,11 fm, míg csatornahálózatban 1 372,06 fm Sentab cső volt beépítve 2011-ben [Fürtös, 2011].

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

2012 nyarán egy 1000 mm átmérőjű Sentab cső héjkitörése következett be, mely jelentős károkat okozott (1.1. ábra). Amellett, hogy a környező területek ivóvíz ellátottságában is időszakos zavart okozott, jelentős anyagi kár keletkezett. 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 térd magasságig állt a környező utcákban (1.2. ábra), és bejutott a környező lakóházak pincéjébe és egy építés alatt álló földalatti létesítménybe is, ahol a víz jelentős anyagi károkat okozott [mno.hu, 2012].



1.1. ábra: Sentab csőtörés 2012 nyarán [panoramio.com]

Mivel a csőhálózat földdel, illetve valamilyen burkolattal takart, így komoly problémát jelent a csövek állapotvizsgálata. Legtöbb esetben csak a feltárt csőszakaszok vizsgálatából tudunk következtetni a környező csőszakaszok állapotára. Mivel a feltárások akadályozzák a forgalmat, és emellett komoly anyagi vonzata is van, így törekedni kell a lehető legkevesebb feltárássra.



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

A feladatot tovább bonyolítja, hogy a feltárt csőszakaszok legtöbbször üzem alatt vannak, így akár 8-10 bar víznyomás is lehet bennük. Ezért nagy elővigyázatossággal kell a vizsgálati módot, illetve a vizsgálati helyet kiválasztani. Egy váratlan tönkremenetel a vizsgálószemélyzet testi épségét is veszélyeztethetné. Ebből kifolyólag kizárólag roncsolásmentes vizsgálatokra van lehetőség az üzem alatt levő csöveken. Roncsolásos vizsgálatokat kizárólag a csövek cseréjekor kiemelt csőelemeken lehet végezni.

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.

Ez természetesen önmagában nem jelenti azt, hogy 2019-től azokat a csöveket tönkrementnek kell tekinteni. Dr. Kausay Tibor „Beton, a betonszabvány néhány fejezetének értelmezése” című könyvében [Kausay, 2013] jól rávilágít a tervezési élettartam és a használati élettartam közti óriási különbségre, miszerint:

„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:

Használati élettartam $\geq$ Tervezési élettartam”.

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

Ezért fontos a Sentab csövek állapotának folyamatos ellenőrzése, hogy a csövek várható élettartam megbecslésével ki lehessen jelölni a kritikus csőszakaszokat és a tönkremenetel elkerüléséhez szükséges intézkedések módjait.

A csőszakaszok cseréje nagyon költséges, illetve a munkálatok idejére meg kell oldani a környező területek ivóvíz ellátását is. Ezért törekedni kell arra, hogy minél precízebben meg lehessen határozni a csövek állapotát és várható élettartamát, hiszen komoly költségeket jelent annak túl-, illetve alulméretezése is. Emellett a várható élettartam túlbecslése emberéleteket is veszélyeztethet.

Ezek alapján aktuális kérdéssé vált, hogy milyen lehetőségek vannak a Sentab típusú, feszített vasbeton csövek állapotromlásának, illetve várható élettartamának elemzésére. A csövek földdel való eltakartsága és üzemeltetés közbeni zártsága az átlagnál nagyobb nehézségeket támaszt a szóba jöhető vizsgálatok területén.

Közel 3 éve kezdtem el foglalkozni a Sentab csövek vizsgálatával. Azóta üzem közbeni helyszíni roncsolásmentes vizsgálattal 8 db csőelemet, üzemen kívül helyezett és a földből kiemelt 10 db csőelemen roncsolásos vizsgálatában vettem részt. Az üzemen kívül helyezett csőelemek közül egy héjkitöréssel tönkrement darab, melynek vizsgálatával a tönkremeneteli folyamat tanulmányozására is lehetőségünk nyílt.

Jelen tudományos munkámban a 3 év alatt elvégzett kutatómunkám, és vizsgálataim eredményét foglaltam össze.

A vizsgálandó szerkezet főbb jellemzőit fontos ismerni a szerkezet állapotvizsgálatának elvégzéséhez, hiszen a felhasznált anyagok (pl. használtak-e klorid tartamú adalékszer), illetve gyártástechnológia (zsaluillesztések kialakítása, feszítőhuzalok korrózióvédelme) ismerete támpontot adhat a vizsgálati helyek, illetve vizsgálati eljárások kiválasztásában. Ezért fontosnak tartom dolgozatom elején röviden ismertetni a Sentab csövek jellemzőit.

2. SENTAB CSŐ 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 vibrohidropréseléses 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 vele együtt Szalva Tamást (a BVM Szentendrei Gyárának nyugalmazott főmunkatársát), kiderült, hogy Sentab cső összesen mintegy 360 km hosszúságban készült (különböző átmérővel) a szentendrei gyárban.

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 tömítőgyűrűk természetes vagy mesterséges műkaucsuk alapú tömör lágygumiból készültek.

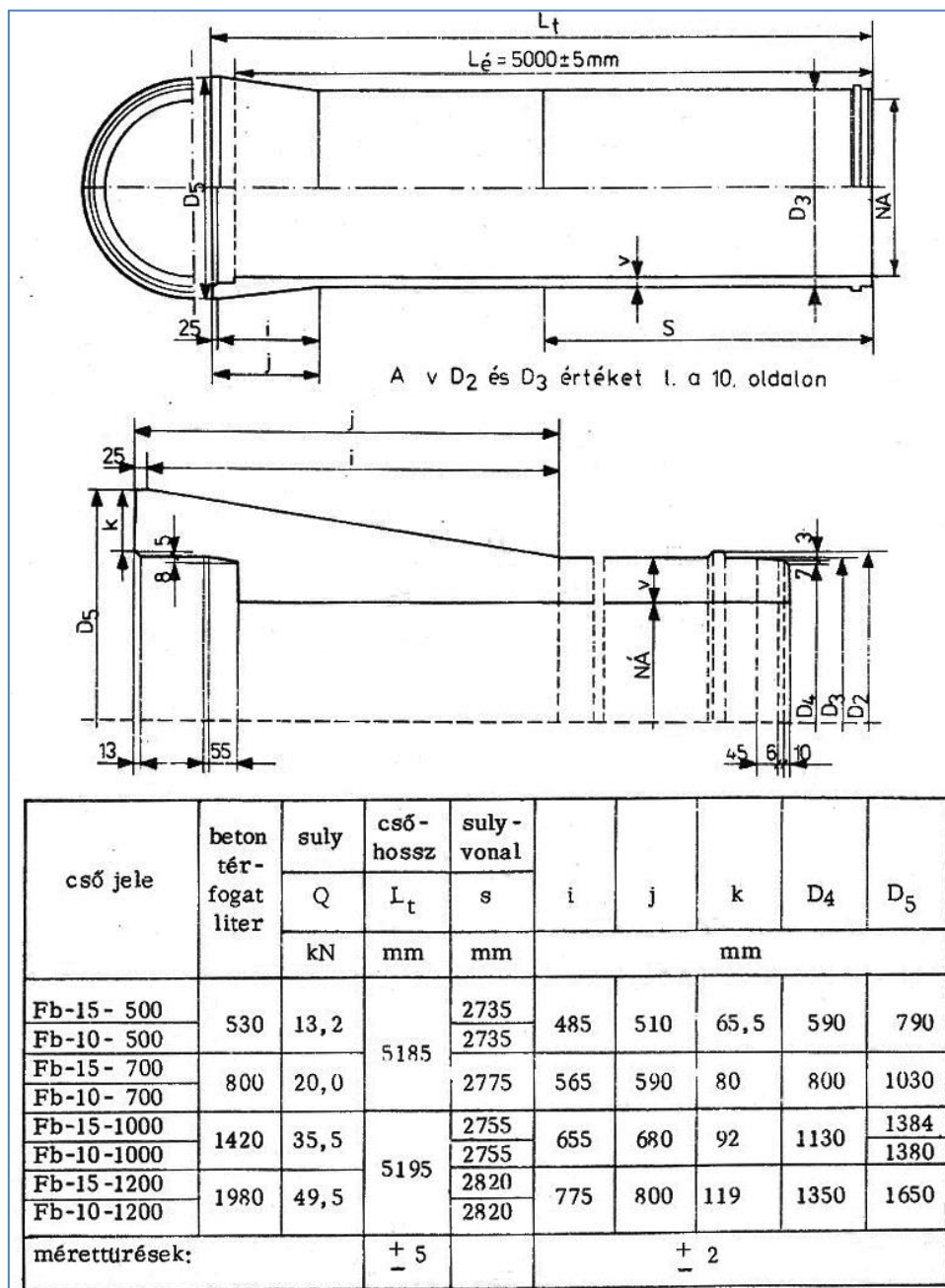
2.1. Sentab csövek típusai

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

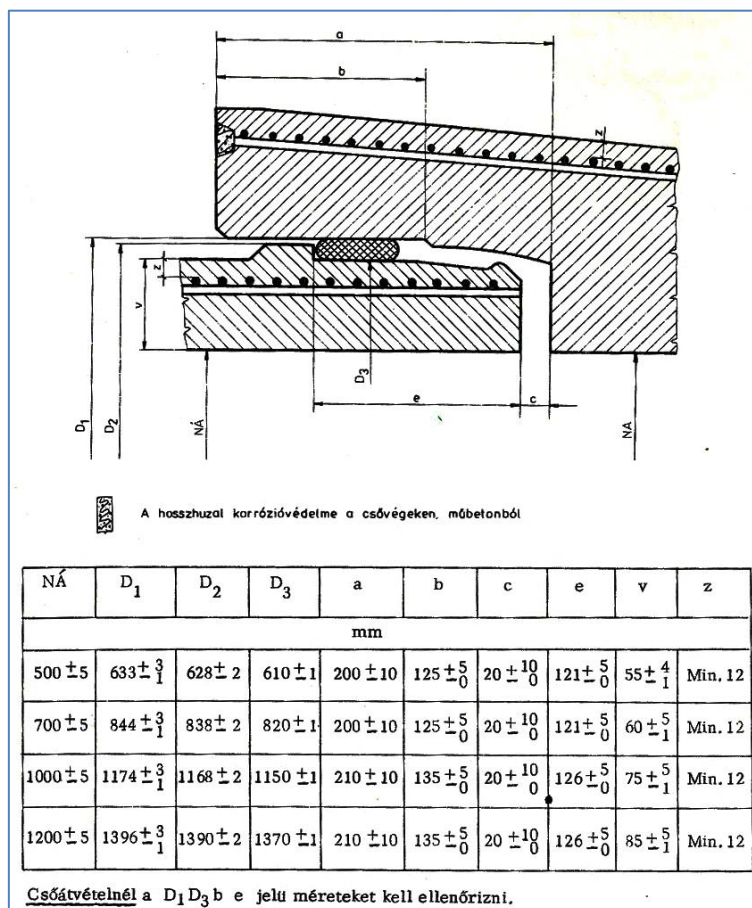
- Fb-10- 500,	- Fb-15- 500,
- Fb-10- 700,	- Fb-15- 700,
- Fb-10-1000,	- Fb-15-1000,
- Fb-10-1200,	- Fb-15-1200.

(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 a 2.1. ábra, illetve a 2.2. ábra tartalmazza.



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



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

2.2. Sentab csövek gyártástechnológiája

Dr. Balázs György könyve [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 engedély-köteles 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 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 tömítő szalagot a csövek helyszíni vizsgálata során sikerült nyomokban megtalálnom hozzávetőlegesen a beton külső felülete alatt 1 cm-rel (2.3. ábra). Ebből arra tudok következtetni, hogy a beton be tudott jutni a zsalu és a tömítő szalag közé, így esetleg a cementpép egy része kiszivároghatott a zsaluillesztéseknél. Ez tartóssági szempontból kritikus hely lehet, így vizsgálataim során fokozott figyelmet szenteltem a zsaluillesztéseknek.



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

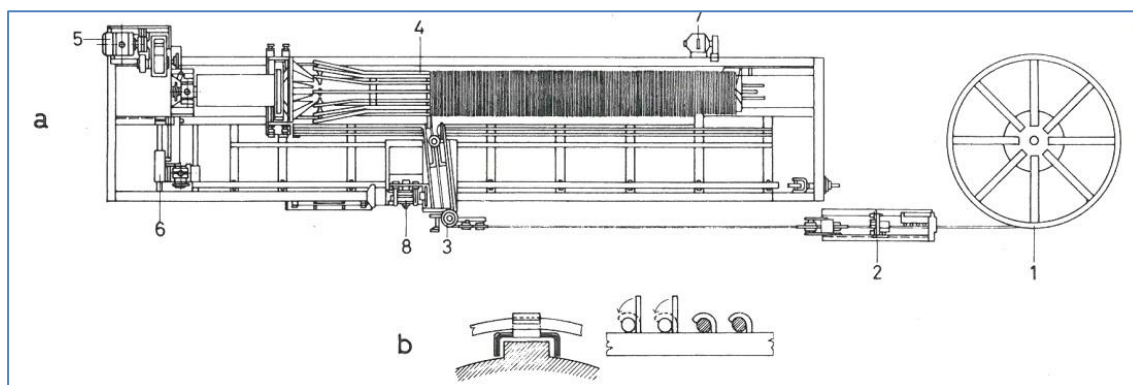
A gyártás a spirálhuzalrendező lécek legyártásával kezdődött, melynél vékony lemezszalagból olyan U keresztmetszetű elemeket gyártottak, melyek az előírt huzal osztásköznek megfelelő lefogó füleket tartalmazott (2.4. ábra).



2.4. ábra: Az egyik helyszíni vizsgálatom során feltárt spirálhuzalrendező lécek (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 hosszuzalok külső acélsablonra való feszítését. A hosszirányú feszítőbetéteket kézi feszítőpuskával, szálanként feszítették meg. A sűrűmenetű spirálvasalás rendezőlécekre tekercselését is a vasalás előkészítő munkahelyen végezték (2.5. ábra).



2.5. ábra: A svéd SENTAB cég spirálhuzalváz 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.

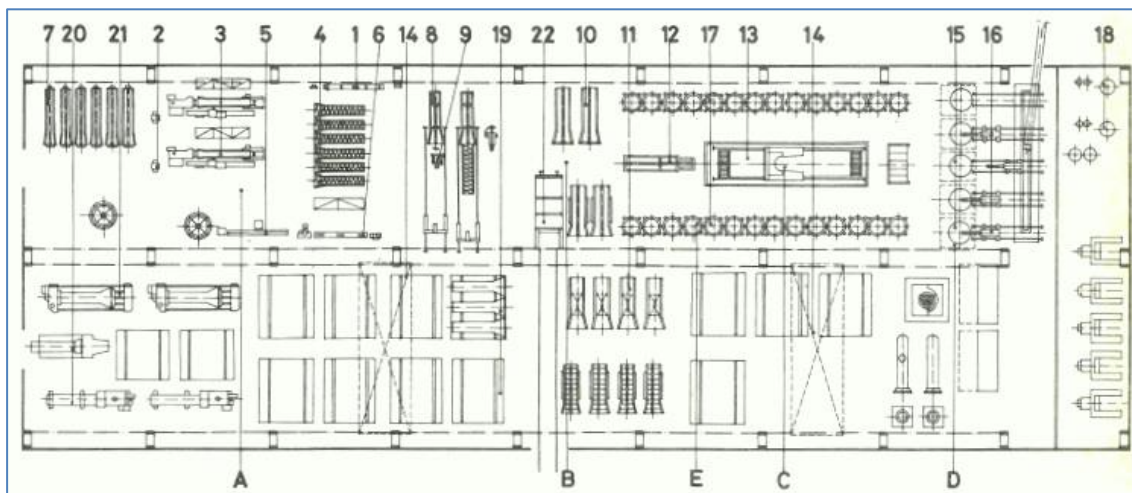
Vizsgálati tapasztalataim alapján megállapítható, hogy egyes esetekben a spirálisan futó feszítőhuzal oldalirányba elmozdult a zsaluzatban, így az egyik oldalon sokkal nagyobb betonfedés volt, míg a vele átellenes oldalon a tervezett betonfedés érték alatt. Ezek alapján arra tudok következtetni, hogy nem használtak megfelelő számú műanyag távtartót. (Megjegyzem azonban, hogy a túl sok műanyag távtartó ugyancsak esetleges hibahelyek lehetnének, hiszen a műanyag és a beton eltérő tulajdonságai miatt esetleg a határfelületen elválhatnak, így a károsító anyagok könnyebben bejuthatnak a feszítőhuzalokig.)

A befeszített külső sablonokat és a gumiköpennyel ellátott belső sablonokat a sablon-összeszerelő aknában szerelték össze (2.6. ábra 13. munkarész). Az aknától hiddaruval a betonozó helyek egyikére emelt sablont álló helyzetben csigás betonadagolóval töltötték meg és vibrálással tömörítették [Fogarasi, 1986].

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 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 vasalást. A nyomást fenn kellett tartani addig, amíg a beton a gőzölés hatására a 40 N/mm² 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.



2.6. 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) Spirálhuzalrendezőlécz 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) Hiddaru, 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

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 „kiégették” és a keletkezett üregeket epoxigyantával töltötték ki (2.2. ábra).

Tapasztalataim alapján a hosszanti acélbetétek végeinek korrózióvédelme nem volt megfelelő. Több helyen rozsdafoltot figyeltem meg a beton felületén. Ezeknek a korróziós helyeknek a vizsgálatára fokozott figyelmet szenteltem. 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 (2.7. ábra). A helyszíni vizsgálataim 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?

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 m^2 -t, illetve a kerület 25%-ánál nagyobb ívet nem foghatott át. A javításkor a táskásodott felületet kb. $30 \times 30 \text{ cm}$ -es hálóban átfűrték a vasalásig. A lyukakon keresztül műgyanta anyagú 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.



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

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.

2.3. Sentab csövek gyártás során és beépítéskor végzett ellenőrzések

A csövek méreteit 1 mm pontosságú mérőeszközzel végezték. (A mérettűrések értékei a 2.1. ábrán és 2.2. 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 a csöveknek. 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 1 bar/perc sebességgel kellett a megadott értékig növelni, majd azt 30 percen át tartani. A próbanyomás közben szivárgás, csöpögés, nedvesedés sehol sem jelentkezhetett [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 vetették alá. A csöveket a minősítéshez ún. robbantásnak is alá vetették, ami azt jelenti, hogy 12 sec 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 (2.1. táblázat). Az előírt betonszilárdságot próbakockán ellenőrizték.

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

Jel	NYOMÁSOK		ÉLTEHER Repesztő p kN/m
	próba PNY bar	repesztő RNY	
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			120

A csöveknél a felület állapotát szemrevételezéssel ellenőrizték. A felületi hibák megengedett mértékét a 2.2. táblázat tartalmazza. (Szükség esetén a hiba mértékét megméréssel ellenőrizték.)

A 2.2. táblázatban szereplő hibák csak abban az esetben voltak megengedettek, ha azok nem okozhatták a cső teherbírásának csökkenését, vízzáróságának romlását.

A külső felület állapotát kopogtatással kellett ellenőrizni. A kopogtatást 50 cm élhosszúságú, négyzetháló mentén végezték. Azokon a helyeken, ahol a külső átmérő megváltozik (nyaknál és a csapos végénél), 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 összehúzósa során ellenőrizni kellett, hogy a gumigyűrű a kerület mentén egyenletesen és csúszásmentesen kezd-e görbülni. 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 a 2.2. 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 vezetékszakazon a kapcsolati szögeltérés mértékét, a kapcsolati gumigyűrű mélységi elhelyezkedését, valamint a kapcsolati ütközési hézag mértékét.

A már lefektetett csővezetékszakaszt 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.

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

A felület állapotának leírása	A hiba megengedett mértéke
Üregek, fészesség 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, fészesség, 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 teherbírást 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

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 eredményezné. Ennek megfelelően a nyomáspróba előtt ellenőrizni kellett az iránytörések, elágazások, lezárások környezetében a kitémasztásokat, 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 vezeték teljes feltöltése után 24 órával kezdődött meg a vizsgálat. 2 óránként 3 bar-ral növelték a vezetékben 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 után táplált vízmennyiséget. A nyomáspróbán akkor felelt meg a vezeték, ha az 1 órán keresztül utánpótlott vízmennyiség mennyisége nem haladta meg a $q=0,005$ liter/m²/óra fajlagos mennyiséget, ami 1 km hosszú vezetékszakra nézve $Q=0,016 D \times L$ (ahol: Q a vízmennyiség [liter/óra], D a névleges belső átmérő [mm], L a vezeték hossza [km]) [Mester, 1978].

A nyomáspróbát követően a vízvezetékét erős vízárammal át kellett öblíteni, majd 24 órás behatással klórral kellett fertőtleníteni. A leöntésnél az öblítő víz szabad klórmaradéka 10 mg/liternek kellett lennie. Fertőtlenítés után az ivóvízvezetékét újból 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 igyekeztek minimalizálni a gyártási, illetve beépítési hibákat.

2.4. Sentab csövek korrózióvédelme

Amint azt már korábban írtam, S 54 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 szulfáttartalma 0-4000 mg/l (SO₄),
- a talaj vízzoldható szulfáttartalma 0-6000 mg/kg (SO₄),
- a csövek feleljenek meg a Műszaki Előírás minden feltételének,
- a csövek felülete ne legyen táska,
- 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 tapasztalataim alapján a szükséges javításokat epoxigyanta tartalmú javítóanyaggal végezték el.

3. FESZÍTETT VASBETON NYOMÓCSÖVEKET ÉRŐ KÖRNYEZETI HATÁSOK

A leromlási folyamatok vizsgálatához először fontos tisztáznunk, hogy milyen környezeti hatások érik 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.

Egy vasbeton szerkezet anyagtani szempontból vett leromlása kapcsán elsőként szokták említeni a **karbonátosodás** kérdését.

Szerkezetek tervezése kapcsán a beton tartóssága érdekében az MSZ EN 206-1:2002 szabvány 4. fejezete környezeti osztályokat (kitéti osztályokat) határoz meg. Karbonátosodásnak ellenálló beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek betonjainak a környezeti hatások alapján besorolva, az XC1, XC2, XC3, XC4 osztályok valamelyikének követelményeit kell teljesítenie. Mivel a vizsgálandó szerkezet a földben található, ahol nedves, ritkán száraz körülmények vannak, így a vele szemben támasztott követelmény XC2 osztály (melybe például az épületalap, támfalalap, mélyalap, kiegyenlítő lemez tartozik).

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** érte a közutak alatt. Azóta környezetvédelmi megfontolásból 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 a következő előírást találtam egyedül 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 kloridot, illetve jelenleg jelentős mennyiségű NaCl-ot használnak fel az utak síkosság mentesítésére.

Nem szabad azt sem elfelejteni, hogy az ivóvíz is tartalmaz klórt, 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.

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

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

Emellett a beton leromlása kapcsán szóba kerülhet még a szulfátos víz, illetve gáz okozta duzzadásos betonkorrózió. Ennek mechanizmusát ugyancsak érdemes megvizsgálni a talajban levő beton, illetve vasbeton szerkezetek kapcsán.

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

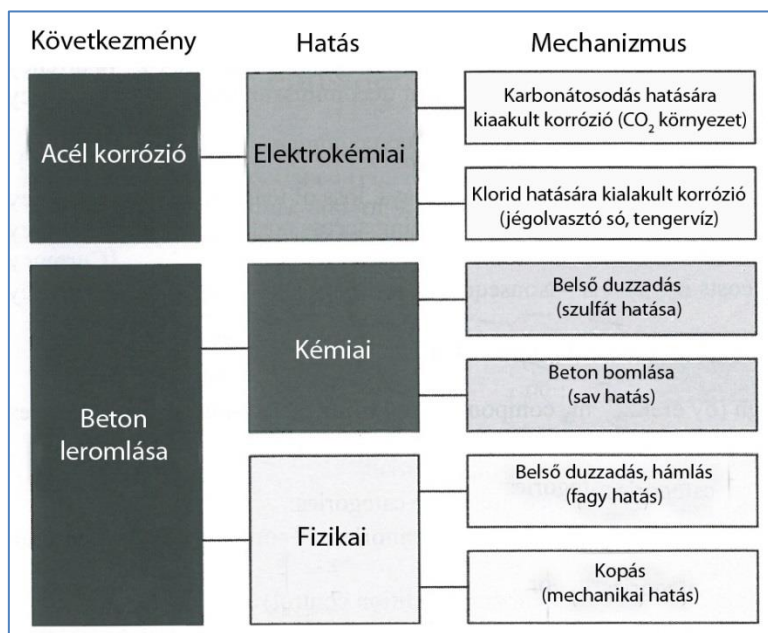
	Budapest									
	XI. KER.	XII. KER.	XIII. KER.	XIV. KER.	XV. KER.	XVI. KER.	XVII. KER.	XVIII. KER.	XIX. KER.	XX. KER.
Klorid [mg/l]	22	21	22	21	21	21	23	27	25	27
pH	7,55	7,58	7,6	7,63	7,64	7,63	7,62	7,55	7,48	7,46

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

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

4. FESZÍTETT VASBETON NYOMÓCSÖVEK TIPIKUS LEROMLÁSI MÓDJAI

A vasbeton szerkezetek állapota a különféle hatások miatt elkezd romlani. Többféle leromlási folyamatot is megkülönböztethetünk (4. 1. ábra).



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

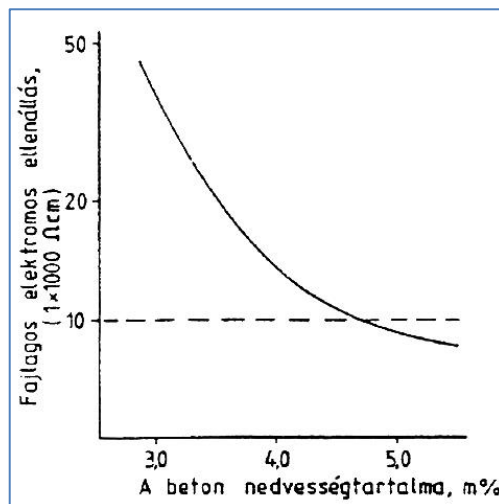
Vasbeton szerkezeteknél nem csak a beton leromlása okozhat problémát, hanem a betonban található acélbetétek, feszítőhuzalok korróziója is. Az acélbetétek, illetve feszítőhuzalok korróziója során a fémes állapotból a nem fémes vegyületekké való átalakulást értjük, mely kémiai, vagy elektrokémiai folyamatokon 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 következik be [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.

Az acélbetétek korróziójához 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 [Kocsányiné Kopecskó, 2004] alapján korrózióval akkor kell számolni, ha a beton fajlagos ellenállása 5-10 $\text{k}\Omega\text{cm}$ alá csökken (4.2. ábra), továbbá

- az oxigén acélbetéhez, illetve feszítőhuzalhoz jutása is fontos, mely függ a betonfedés mértékétől, a beton pórusrendszerétől (tömörségétől), és a környező víztartalomtól.



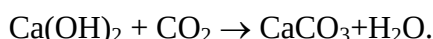
4.2. ábra: Nedvesség hatása az elektromos ellenállásra [Hartl, Heft 37]

Ha a 3 feltétel közül mindegyik teljesül, akkor az acél elkezd rozsdásodni a betonban.

4.1. Karbonátosodás okozta acél korrózió

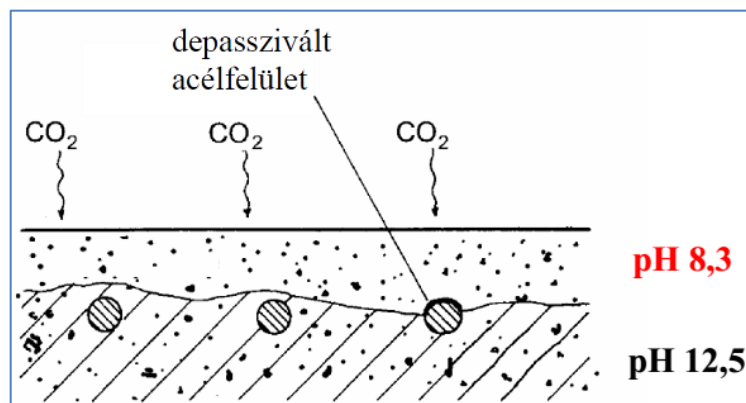
A portlandcement hidratációja során le nem kötött kalcium-hidroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) keletkezik, melynek hatására a beton lúgos kémhatásúvá (~ 13 pH) válik. A 12,5-13,5 pH értékű lúgos közeg hatására az acél felületén mikroszkopikus vastagságú oxid-réteg keletkezik, mely passzívréteget hoz létre. 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -dal. A beton karbonátosodásának folyamatát leegyszerűsítve a következő egyenlettel írhatjuk le:



Ez a folyamat 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 korrózió veszély miatt kedvezőtlen. A karbonátosodás során a beton pH értéke 8,3-ra csökkenhet, így megszüntetve az acél körüli passzíváló réteg (4.3. ábra).

A karbonátosodás mélységét úgy szokás értelmezni, mint azt a távolságot a betonszerkezet külső felületétől, melyben 8,3 alá csökkent a beton pH értéke.

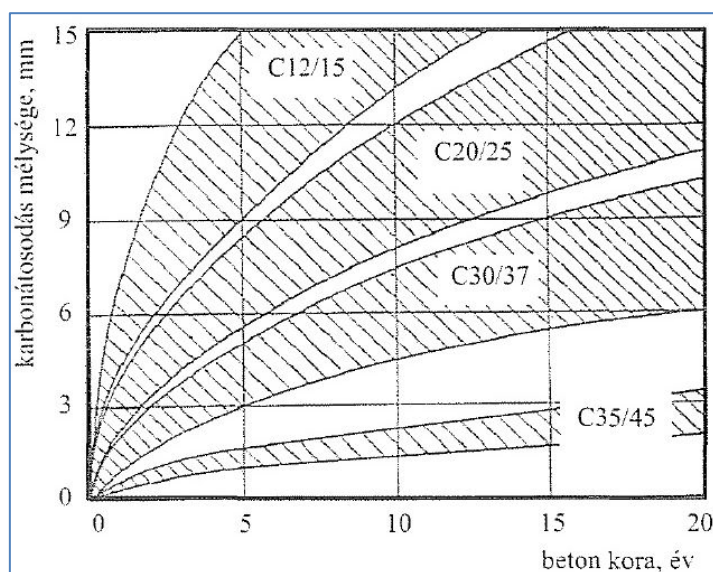


4.3. ábra: Karbonátosodás és a depasszivált acélfelület [Borosnyói, 2013]

A karbonátosodás sebességét leginkább a következő tényezők befolyásolják [Balázs-Borosnyói, 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 karbonátosodás előrehaladásának sebessége kezdetben nagyobb, majd folyamatosan csökken, mert a már karbonátosodott, tömörebb réteg a széndioxid behatolását akadályozza (4.4. ábra).

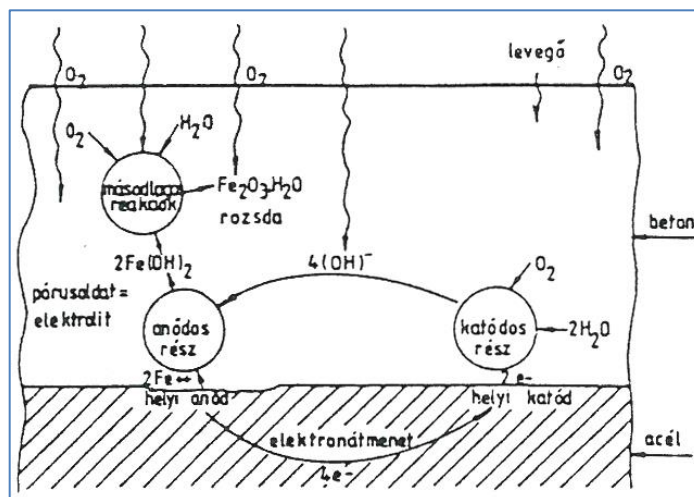


4.4. ábra: Karbonátosodás mélysége az idő és a beton nyomószilárdságának függvényében [ffstatika.blog.hu]

Rozsdásodás során a vas felületén először vas(II)-hidroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) képződik (4.5. ábra), amely vízvesztéssel alakul vörösbarna vas(III)-oxidá (Fe_2O_3), majd további átalakulással rozsdává ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Az így keletkező rozsdá (trivas-tetraoxid-hidroxid, $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{OH})$) móltérfogata akár 5-6-szorosa is lehet az acélénak, ezért a környező betonra feszítő hatást fejt ki [Kausay, 2013]. Ennek hatására repedések alakulhatnak ki a betonban,

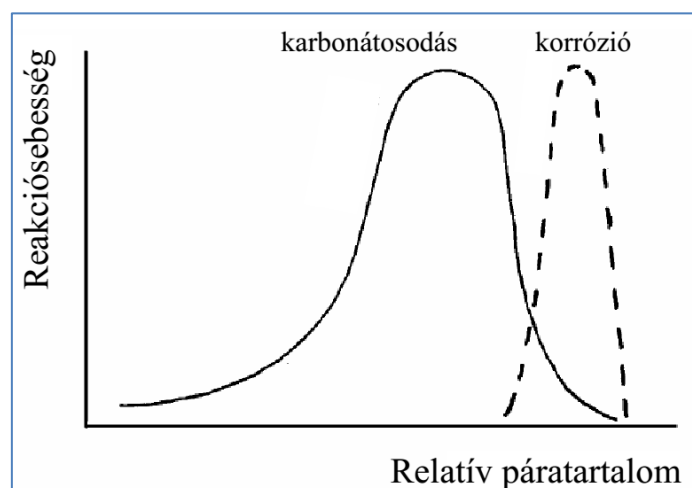
amin keresztül a víz, illetve az oxigén is akadálytalanul jut el az acélra. A repedések kialakulásával a leromlási folyamat felgyorsul. A repedések kialakulását követően a további térfogat növekedés miatt a betonfedés leválhat, mellyel a leromlási folyamat még tovább gyorsul. A repedések kialakulása, 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.



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

Fontos kihangsúlyozni azonban, 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.



4.6. ábra: Karbonátosodás és az acélkorrózió sebességének sematikus összefüggése a relatív páratartalommal [Balázs-Borosnyói, 2011]

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 válik nehézkessé (4.6. ábra) [Balázs-Borosnyói, 2011].

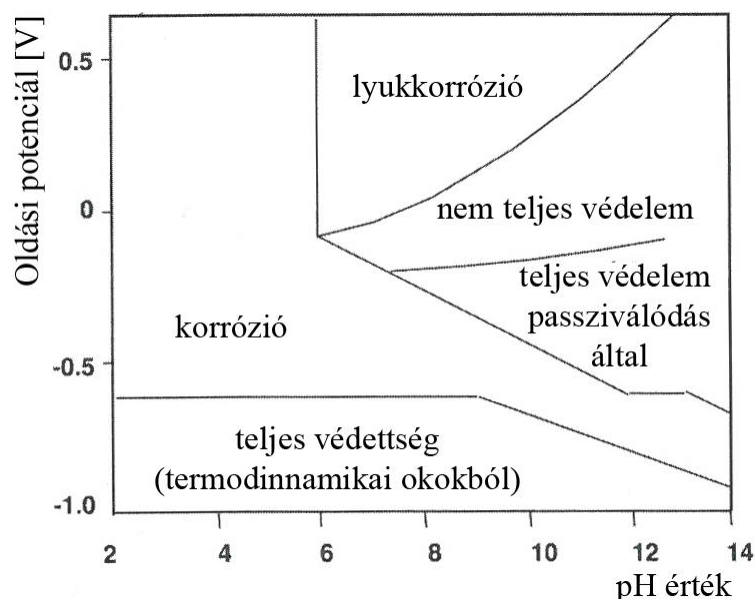
4.2. Kloridion-tartalom okozta acélkorrózió

A kloridionok az előző fejezetben ismertetett korrózió mechanizmust megváltoztatják. A lyukkorrózió jellegzetessége, hogy a lyuk átmérője lényegesen kisebb, mint a mélysége. Emellett a lyukkorrózió nem jár térfogat-növekedéssel, ami különösen veszélyessé teszi a nehéz észlelhetősége miatt. Ennek hatására az acélbetét belseje megszűnhet (4.7. ábra), miközben látszólag a betonfelületen semmilyen jele nincs a hibának. Kis betonfedés esetén, illetve a szabadban levő betonacélon teknő alakú, rozsdabarna korróziót is okozhatnak [Kausay, 2013].



4.7. ábra: Feszítőhuzal lyukkorróziója az egyik vizsgált Sentab csövön, a) hosszanti betét teljesen kilyukadt, így a keresztmetszet jelentősen lecsökkent, míg a spirálisan futó betét belseje ugyancsak tönkrement, b) a hibahely feltárását követően a hosszanti feszítőhuzal megmaradt keresztmetszete, (Kép készült: 2013. 07. 17.)

Kloridion jelenlétében a korrózió akkor is kialakulhat, ha a karbonátosodás mélysége nem érte el az acélbetéteket (4.8. ábra). Ha a beton pH értéke nagyobb, mint 9, akkor a korrózió pont-, vagy lyukkorrózió formájában következik be. A korrózióhoz kloridionon mellett ebben az esetben is szükség van oxigénre és vízre.



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

Ahogy a 4.9. 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.

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

A klinkerásványok, illetve a cement a kloridionokat stabil vegyületeként (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.

A kémiaiilag kötött kloridion mennyisége függ a cementfajtától. A cement C_3A tartalma jelentősen befolyásolja a kloridion megkötő képességet. A szulfátálló portlandcementek (mai jelölésben pl.: CemI 42,5 N-S cementek) kis C_3A tartalmuknak köszönhetően szulfátállóak, így kis kloridion megkötő képességük van.

Jelen vizsgálatom tárgyát képező Sentab csövek gyártásához is szulfátálló, S54 típusú cementet használtak fel, melynek C_3A tartalma kicsi. Ennek következtében a Sentab csövek betonjának kloridion megkötő képessége kisebb, mint egy hagyományos cementnek.

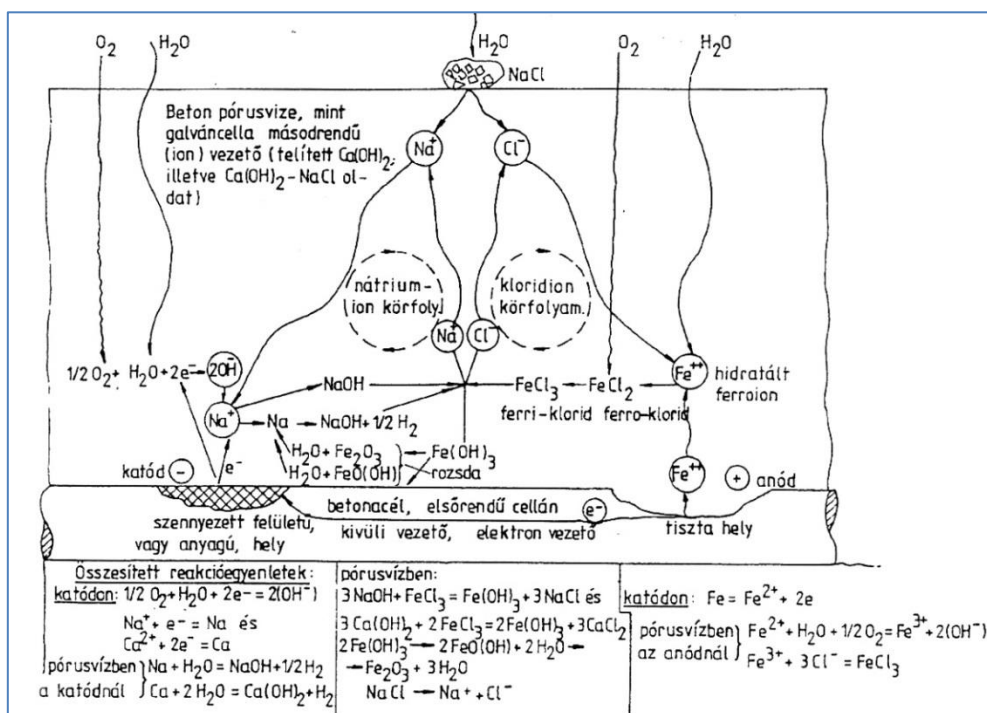
Azonban fontos azt is látni, hogy a beton egy adott mennyiségig képes megkötni a kloridiont. Ha annál több kloridion jut a betonba, akkor az már korróziót okozhat. Mivel a kloridion katalizátorként van jelen a korrózió nál, így a korrózióhoz szükséges mennyiség elérését követően a korrózió folyamata fennmarad, mindaddig, amíg a többi feltétel is biztosított. Tehát a szulfátálló cementeknél a kloridion tartalom okozta korrózió hamarabb tud kialakulni, de a kialakulást követően nem befolyásolja jelentősen a reakciót.

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

Az acélbetét korróziója csak akkor lép fel, ha a vasalás mélységébe lejutó kloridion mennyisége egy kritikus határértéket túllép. A kritikus kloridion tartalomra több definíció is

létezik. Schiessl és Raupach [Schiessl - Raupach, 1990] szerint a kritikus kloridion tartalomra két definíció adható:

- 1) kritikus az a kloridion tartalom, amelynél az acélbetét felületén a depassziválódás fellép és megkezdődik a vas oldódása, függetlenül attól, hogy a betonfelületen a rozsdásodás látható-e;
- 2) kritikus az a kloridion tartalom, amelyik szerint a károsodás a korrózió megjelenéséhez vezet.



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

A két definíció alapján eltérő kritikus kloridion tartalmat lehet meghatározni. A választott definíción és kísérleti eljárásán túl, fontos a kloridion tartalom meghatározásánál, hogy az összes 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]:

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

ahol: $c_{\text{cl,crit}}$ = kloridion koncentráció, ahol a lyukkorrózió lehetséges,

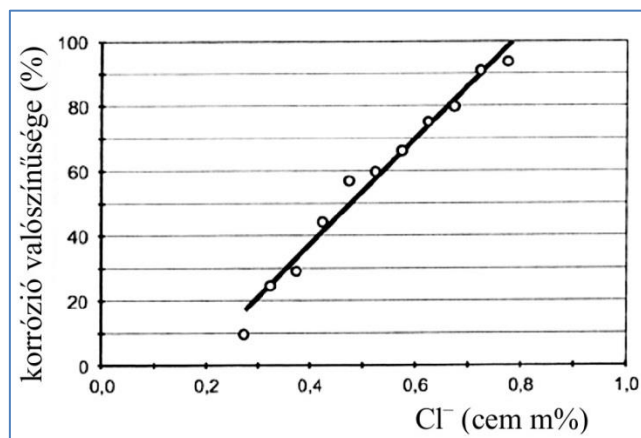
c_{OH} = hidroxid (OH^-) koncentráció.

Sok esetben az összes kloridion tartalmat határozzák meg, és az alapján adják meg a kritikus kloridion tartalmat. Azonban fontos tisztában lenni azzal, hogy korróziót csak a pórusvízben levő, nem kötött kloridion okoz.

Irodalmi adatok alapján az mondható, hogy a korróziót okozó összes kloridion tartalom hozzávetőlegesen 0,2 m% a cement tömegére vonatkoztatva [Balázs-Borosnyói, 2011]. A biztonság javára 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 [Breit, 1997] szerint a cement tömegére vonatkoztatott 0,75% kloridion tartalomig, a korróziós kockázat lineárisan nő (4.10. ábra). Míg a cementre vonatkoztatott 0,85 m% összes kloridion tartalom már az acél felületén felületi korrózióhoz vezet.



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

4.3. Savas és lágú víz okozta oldódásos betonkorrózió

Szakirodalom [Kausay, 2013] alapján oldódásos betonkorrózióról beszélünk, amikor a szilárd beton savak, vagy savas vizek (pl.: szénsavas gyógyvizek) érik. A savak hatására a cementkő, illetve a finomszemű karbonátos adalékanyagok kioldódhatnak. A cementkő meszes fázisait a savak vízzeloldható fázisokká alakítják át, így vizes és atmoszférikus hatásokra lebomlanak, oldódnak. Esővíz és lágú víz hatására is lassan kioldódhatnak a cementkő vízzeloldható összetevői. A lágú víz kilúgozó hatására a betonban levő szabad Ca(OH)_2 kioldódása a cementkő többi alkotórészének felbomlásához vezethet, melynek hatására a beton elveszíti szilárdságát és szétesik.

A betont környezeti osztályokba kell sorolni a természetes talajvíz, illetve talaj kémiai agresszivitásának függvényében. A 4.1. táblázatban vannak összefoglalva az MSZ EN 206-1:2002, illetve az ÖNORM B 4710-1:2007 (német) szabvány szerinti osztályba sorolás paraméterei.

4.1. 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° = °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 helyén van erre tapasztalat. ^{f)} A 3000 mg/kg határértéket 2000 mg/kg értékre kell mérsékelni, ha fennáll a szulfácionok felhalmozódásának a betonban a száradás és a nedvesedés ciklikus változása vagy a kapillárisfelszívás következtében.				

4.4. Szulfátos víz és gáz okozta duzzadásos betonkorrózió

Szulfátot tartalmazó vizek, illetve gázok duzzadásos betonkorróziót okozhatnak. A szulfát szilárd betonba való behatolásával, a cementkövel reakcióba lép, így új ásványok (pl.: másodlagos ettringit, illetve taumazit) keletkezik. A másodlagos ettringit képződés során a térfogata 2,5-szeresére növekszik, melynek hatására a beton megrepedhet.

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 = Al₂O₃/Fe₂O₃) 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].

A Sentab csöveknél S54-es szulfátálló cementet alkalmaztak, mely ezen a néven már nincs forgalomban. Korábban az aluminát 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 [Pluzsik, 2013]. Ezek alapján a ma érvényben lévő előírásban meghatározott szulfátálló cement AM követelményének messzemenően megfelelt az S54-es cement.

Mivel a Sentab csövek széles körben (több településen) lettek alkalmazva, így az előforduló összes talaj, illetve talajvíz viszonyra alkalmasnak kellett lennie. Ennek megfelelően indokolt volt, hogy a Sentab csövek gyártásánál az S54-es cementet alkalmazták.

5. LEHETSÉGES VIZSGÁLATI MÓDOK

A vizsgálatom tárgyát képező feszített vasbeton nyomócsövek kicserélésének komoly szerelési, szervezési (zavartalan vízellátás biztosítása, útlezárás, stb.), illetve költség vonzata van, így még üzem alatt kell vizsgálni azok állapotát, meghatározva a kritikus állapotú csőszakaszokat. Mivel a csövekben 8-10 bar víznyomás van, így üzem alatt kizárólag roncsolásmentes vizsgálatokat lehetett végezni. A tervszerű karbantartás, illetve csőtörések miatt kiemelt, rossz állapotú csőelemeken lehetőségem volt roncsolásos vizsgálatok eredményével is kiegészíteni a kutatásomat.

Az üzemben lévő csöveken a következő vizsgálatok elvégzésében működtem közre:

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

A kivett, üzemben kívüli csöveken az előbb felsorolt vizsgálatokon kívül a következő vizsgálatokat végeztem 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 (röntgendiffrakciós és derivatográfiás vizsgálattal),
- kijelölt rozsdafoltok vizsgálatát CT (Computer Tomography, azaz számítógépes tomográfia) segítségével.

5.1. Szemrevételezéssel való állapotfelmérés

A szemrevételezést konzulenseim segítségével végeztem el. Minden megvizsgált cső esetén a környezet jellemzőinek rögzítésével kezdtem. Külön figyelmet fordítottam arra, hogy a vizsgált cső út alatt van-e, vagy zöldterület alatt, talajvíznek vannak-e nyomai a cső

környezetében, 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,
- бүтүс felületeken a hosszbetétek végei,
- toknyak iránytörésének környezete.

Emellett dokumentáltam 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 század-mm pontosságú tolómérőt használtam (5.1. ábra). A hibahelyeket fényképes formában is dokumentáltam, a későbbi elemezhetőség végett.



5.1. ábra: Cső бүтүс felületén észlelt rozsdafolt 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 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.

5.2. Betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése

A betonszilárdság egyenletességének roncsolásmentes vizsgálatát N-típusú Schmidt-kalapáccsal (ütőenergiája 2,207 N×m) végzett méréssel ellenőriztem. A vizsgálatok konzulenseim iránymutatása mellett folytak.

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.

A Magyar Mérnök Kamara által 2013-ban kiadott [Kausay, 2013] könyv 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-kalapáccsos vizsgálat alkalmas lehet a betonszilárdság egyenletességének ellenőrzésére.

A vizsgált csövek felületén, több helyen is megmértem a visszapattanási értéket. Minden egyes mérési helyen 12 visszapattanási értéket határoztam meg, majd az egyes mérési helyeken mért értékek átlagát kiszámítottam.

Ezt követően elvégeztem az előírt (üllőn való visszapattanásnak megfelelő kalibrálás miatti, ütési irány miatti, illetve a karbonátosodás miatti) korrekciókat. Majd összevettem az egyes vizsgálati helyekre kiszámított, korrigált átlagértékeket. Ebből következtettem a betonszilárdság egyenletességére.

5.3. Karbonátosodási mélység ellenőrzése

Az üzemen kívül helyezett csőelemeken megvizsgáltuk a karbonátosodási mélységet. A vizsgálatához kijelölt területen a betonfedést megvéstem, majd 0,1%-os alkoholos fenolftalein oldatot, porlasztásos módszerrel a friss törésfelületre juttattam. Az oldat hatására, azokon a részeken, ahol a pH=9 értéknél nagyobb (nem karbonátosodott a beton) a felület kárminvörös (lila) színűvé alakul, míg a karbonátosodott részeken a beton színe nem változik meg. A vizsgálatok során ügyeltem arra, hogy a beton megvését követő 15 percen belül végezzem el a vizsgálatot, hogy a friss betonfelület karbonátosodása ne következhesen be. Ezt követően meghatároztuk azt a mélységet a cső felületétől mérve, ameddig a fenolftalein oldat hatására nem színeződött el a frissen tört felület.

5.4. Kloridion tartalom vizsgálata nedves analitikai módszerrel

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



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

A vizsgálandó mintát ismert koncentrációjú ezüst-nitrát oldattal titrálták. A kloridionok az ezüst(I)-ionokkal oldhatatlan ezüst-klorid csapadékot képeznek. A Mohr módszernél kálium-kromát indikátort használnak, melyből (miután az összes kloridion elreagált) vörös színű ezüst-kromát keletkezik (5.2. ábra). A vizsgálat során fontos, hogy a vizsgált oldat kémhatását közel semlegesre állítsuk be, ugyanis nagy pH-n ezüst-hidroxid keletkezik, míg kis pH-n krómsav képződik, ami csökkenti a kromátionok koncentrációját, így késleltetve a csapadékképződést.

A vizsgálathoz az általam vett furatpor mintát tovább porítottuk, majd 5 g-ot mértünk ki belőle. Az 5 g mintát 50 ml desztillált vízbe rakták, majd 2 óra elteltével megvizsgáltuk a minta pH értékét. Ezt követően salétromsavval beállítottuk a közel semleges pH értéket. Végül, kálium-karbonát jelenlétében ezüst-nitráttal titrálták a mintát. Ezt követően a belecsepegtetett ezüst-nitrát mennyiségéből számították ki a minta kloridion tartalmát.

5.5. Betonfedés megbontásával elvégzendő vizsgálatok

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

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

Majd a rozsdásodott részeken megbecsültük a feszítőbetétek korróziós tönkremenetelét követő megmaradt keresztmetszet %-os arányát az ép keresztmetszethez képest. Az egyik cső vizsgálatánál a feszítőbetétből mintát vettünk és fototechnikai módszerrel pontosan meghatároztuk a fogyás mértékét.

5.6. Furatpor minta elemzése fázisanalitikai módszerrel

A furatpor mintát röntgendiffrakciós, valamint derivatográfiás vizsgálati módszerrel vizsgálták. A vizsgálatokat a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában végezték. A módszer megértése végett jelen voltam a vizsgálatoknál, de a vizsgálatokat Rónaky Viktória, a tanszék vegyész technikusja végezte el. A fázisanalitikai módszerrel végzett vizsgálatok eredményeinek kiértékelésében Dr. Kopecskó Katalin, egyetemi docens segített. Dr. Kopecskó Katalin PhD értekezésében [*Kocsányiné Kopecskó, 2006*] jól összefoglalta a röntgendiffrakciós és a derivatográfiás vizsgálatok jellemzőit, mely alapján a vizsgálatok a következőképpen zajlanak.

5.6.1. 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. Ezen röntgendiffraktogramok értelmezése komoly szakértelmet igényel.

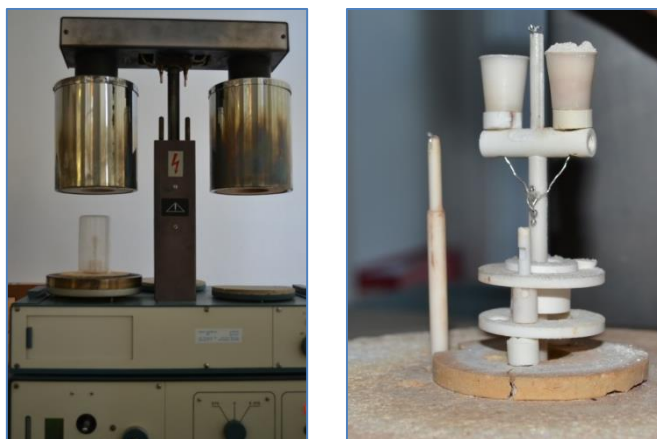
A rendezettség alacsony foka vagy hiánya esetén röntgenamorf vagy amorf fázisokról beszélünk, melyekről nem a jellegzetes, vonalas diffrakciós képet kapjuk. A cement hidratációja során mind kristályos, mind ún. röntgenamorf fázis is keletkezik.

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.

5.6.2. Derivatográfias vizsgálat

A mérésekhez Derivatograph Q-1500 D típusú készüléket használtunk. A minta kis mennyiségét megporították, majd inert anyagú (korund vagy platina) tégelybe helyezték (5.3. ábra), kemencetérben szobahőmérsékletre adott hőmérsékletig egyenletes sebességgel hevítették. A méréshez néhány 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.



5.3. 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.

5.7. CT vizsgálat elvégzése és kiértékelése

A számítógépes tomográfiával lehetőség nyílik arra, hogy a kivett mintának a teljes három-dimenziós belső szerkezetéről képet kapjak. 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 adalékszemcsék, 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 Lublóy, 2011].

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

	ρ [g/cm ³]	HU [-]
Cementkő	2,3-3,2	745-1480
Kvarc adalékanyag	2,65	1800
Levegő		(-1024)-745
Víz	1	(-10)-10
Szálak		
műanyagszálak	0,9	(-10)-10
acélszálak	7,85	3000

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 térfogat egység 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 5.1. táblázat tartalmazza.

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.

Ennek megfelelően két olyan csődarab lett kivágva, melyeken jól megfigyelhető rozsdafoltok voltak. Ezekről készítették CT felvételt.

6. SENTAB CSÖVEK VIZSGÁLATI EREDMÉNYEI

A közel 3 év alatt, amióta Sentab csövek állapotvizsgálatával foglalkoztam 8 üzem alatti és 10 kiemelt, üzemen kívüli csőelem vizsgálatában vettem részt. Ezen vizsgálatok összes

mérési eredményének ismertetése meghaladná a TDK dolgozat kereteit, így azokból a jellemző leromlási folyamatokat választottam ki ismertetésre.

A vizsgált csövek nagyon vegyes képet mutattak. Több olyan cső állapotfelmérésében vettem részt, melyeken jelentős hibákat nem észleltünk. Azonban jó pár olyan csövet is vizsgáltunk konzulenseimmel, ahol a leromlási folyamat már előrehaladott volt.

6.1. Szemrevételezés eredményei

A szemrevételezéskor észlelt hibákat a könnyebb elemezhetőség végett a feltételezett (illetve további vizsgálatokkal alátámasztott) hibaokok szerint csoportosítottam. A hibaokok egy része gyártáskori hibákra vezethetők vissza, melyekre már a gyártástechnológia ismertetésekor utaltam.

Külön alfejezetben foglaltam össze azokat az észlelt hibákat, melyek nem csoportosíthatók egyik tipikus hibahelyhez sem.

6.1.1. Bütös felület szemrevételezése

Ahogy a 6.1. ábrán, illetve az 5.1. ábrán látható, a hosszbetétek végeinél rozsdafoltokat figyeltünk meg a vizsgált csőelemen. A 6.1. ábrán jól látható, hogy az 5 mm átmérőjű feszítőbetét környezetében hozzávetőlegesen 4×4 cm kiterjedésű rozsdafolt alakult ki. Az 5.1. ábráról pedig leolvasható ugyan ennek a rozsdafoltnak a harmadik irányú (magassági) kiterjedése (15,12 mm) is.



6.1. ábra: Sentab cső bütös felületén észlelt rozsdafoltok (Kép készült: 2013. 07. 17.)

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

A Sentab csövek gyártásakor a Műszaki Előírás [Mester, 1978] szerint a hosszanti feszítőbetétek végét kiégették és az üregeket epoxigyantával töltötték ki (részletesebben megtalálható a TDK 2.2. fejezetében). A szemrevételezés alapján el lehet mondani, hogy a végek korrózióvédelme nem volt megfelelő.

Ezeket a hibahelyeket konzulenseimmel az üzemén kívüli Sentab csövek esetén feltárással is megvizsgáltuk. Annak eredményeit a kapcsolódó fejezetben ismertetem.

6.1.2. Zsaluillesztés szemrevételezése

A vizsgált csövek közül többön megfigyeltük a zsaluillesztések környezetében rozsdafoltokat.



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

A 6.2. ábrán egy üzem alatti csövön felmért rozsdafoltok láthatók. A rozsdafoltok mérete $2 \times 1,5$ cm és 4×6 cm között változott. 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.



6.3. ábra: Zsaluillesztésnél észlelt rozsdafolt üzemen kívüli csövön (Kép készült: 2013. 07. 17.)

A 6.3. ábrán hozzávetőlegesen 100×10 cm kiterjedésű felületen lehet több apró rozsdafoltot megfigyelni a zsaluillesztés környezetében. A rozsdá magassági mérete helyenként elérte a 32,79 mm-t. A rozsdatermék a beton felületén a talajjal összefüggő egységet képezett (6.4. ábra).



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

Mivel ez a cső üzemén kívül volt, így a betonfedés eltávolításával lehetőségem volt a hibahely részletesebb elemzésére. *(Ezzel a rozsdafolttal kapcsolatos további eredményeimet a kloridion tartalom vizsgálatánál és a feltárással végzett vizsgálatoknál ismertetem.)*

6.1.3. Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzása

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 *(6.5. ábra)*. A szemrevételezés alapján a betonfelület a rozsdafolt környezetében ép volt, azon mechanikus sérülésnek, bedolgozási hibának nem volt jele.

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



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

6.1.4. Távtartók környezetének vizsgálata

A beton felületén, több helyen is konzulenseimmel megfigyeltük a spirálisan futó feszítőhuzal távtartóit. A gyártástechnológia elemzése kapcsán felmerült, hogy a műanyag távtartók betontól lényegesen eltérő tulajdonságai miatt esetleg hibahelyet jelenthet, mivel nem dolgozik együtt a betonnal, így a két anyag határfelületénél a levegő, víz, illetve vízben oldott anyagok könnyebben eljuthatnak a feszítőhuzalokig.

A szemrevételezés, illetve a későbbi vizsgálataink alapján ezek a távtartók nem segítik elő jelentős mértékben a csövek állapotromlását, hiszen azok környezetében semmilyen rozsdásodást nem tapasztaltam *(6.6. ábra)*.



6.6. ábra: Feszítőhuzal távtartója a beton felületén (Kép készült: 2012. 07. 16.)

6.1.5. Toknyak iránytörésének vizsgálata

A gyártástechnológiából kifolyólag fennáll a veszély, hogy a betonfedés kisebb lesz az toknyak iránytörésének környezetében. Ezt azzal lehet indokolni, hogy a spirális feszítőbetét megfeszítését a belső oldali zsaluzat kitágításával végezték. Ebben az esetben az iránytörést a műanyag távtartók biztosították. Ha azokat nem kellő sűrűséggel helyezték el, akkor a toknyaknál levő iránytörésnél a feszítőbetét el tudott mozdulni kifelé, mely a betonfedés lecsökkenését eredményezné.

Szemrevételezéssel nem tapasztaltunk olyan hibahelyet, melyet erre lehetne visszavezetni. Ettől függetlenül fontosnak tartottuk a csövek toknyaknál levő iránytörésének feltárással való részletesebb elemzését.

6.1.6. Cső további részein észlelt rozsdásodások

A vizsgált csöveken több olyan rozsdafoltot észleltünk, melyeket nem lehetett az előző csoportokba besorolni. Ezek elemzése során olyan további hiba okokat lehetett felderíteni, melyekre a későbbiekben külön figyelmet kell fordítani.

Az egyik vizsgált csövön, a csőszár végéhez közel hosszanti rozsdafoltot figyeltünk meg (6.7. ábrán). Az 1. számú melléklet M.2. ábráján megtalálható a cső felmérési rajza az észlelt hibák elhelyezkedésével. (A 6.7. ábrán látható rozsdafolt az M.2. ábrán feltüntetett 2. számú rozsdafolt.) 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 vizsgáltam.



6.7. 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 (6.8. 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. A hiba okának felderítése végett a rozsdafolt környezetében eltávolítottam a betonfedést. (Ennek eredményeit később ismertetem.)



6.8. 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 konzulenseimmel egy másik csövön is, melyen a rozsdatermék eltávolítását követően egy nagyméretű pórust figyeltem meg, mely feltehetően a feszítőhuzalokig terjedő pórusrendszerrel van összeköttetésben (6.9. ábra). Feltehetően ez is a nem megfelelő bedolgozásra vezethető vissza. (A 6.9. ábrán szereplő rozsdafolt elhelyezkedését az M.1. ábrán 5 számmal jelöltem.)



6.9. ábra: Beton felületén észlelt rozsdafolt a rozsdatermék eltávolítását követően, kép készültek: 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 rozsdatermékeltávolítottam, így alatta egy repedést figyeltünk meg (6.10. ábra). A rozsdafolt környezetének feltárását ebben az esetben is elvégeztem. A hiba feltételezhető okát a feltárásoknál ismertetem.



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

6.1.7. Munkagödör kiemelés miatt keletkezett további sérülések

Több csővön megfigyeltünk a tokvég környezetében mechanikus hatás jeleit. Ezek feltehetően a munkagödör kiemeléskor, a földmunkagép kanálával ejtett sérülések.

Volt olyan, ahol a betonfedés felső 1-2 milliméterét sértette meg a munkagép. Azonban megfigyeltem olyan helyet is, ahol a betonfedést olyan mértékig megbontotta, hogy a feszítőbetétek láthatóvá váltak (6.11. ábra).



6.11. ábra: Munkagödör kiemeléskor megsértett betonfedés (A képek két különböző munkagödörben készültek 2013. 05. 06-án)

A feltárással, illetve visszatemetéssel megbízott cég munkatársa elmondta, hogy a sérült betonfedéseket a munkagödör visszatemetése előtt kijavítják. A javítást epoxigyanta tartalmú habarccsal végzik el.

6.1.8. Korábbi javítások környezete

Vizsgálataink során találkoztam olyan csővel, melynek felületén javítást figyeltünk meg (6.12. ábra). A javítás jellegéből arra következtettünk, hogy a gyártás közbeni ellenőrzéskor észlelték, hogy a felületi hibák mértéke meghaladja a 2.2. táblázatban megengedett határt, így a 2.2. fejezetben ismertetett módon azt még beépítés előtt javították.

A javítás környezetében nem észleltünk semmilyen hibát. Ebből arra következtettek, hogy ez a javítás megfelelő volt.



6.12. ábra: Cső felületén észlelt javítás (Kép készült: 2012. 08. 09.)

Az egyik csövön megfigyeltünk konzulenseimmel a cső бүтүс felületén, illetve a tokvégnél a cső palástján végzett javítás nyomait (6.13. ábra). A paláston észlelt javítási nyom arra enged következtetni, hogy egy korábbi feltáráskor megsérült a betonfedés, majd az előírásoknak megfelelően elvégezték a sérült rész és a бүтүс felületen észlelt rozsdásodásoknak a javítását. A paláston végzett javítás környezetében nem észleltünk semmilyen rozsdásodásra utaló jelet. A бүтүс felületen helyenként a rozsdásodás megjelent a javítások környezetében is. Ez arra enged következtetni, hogy a javítóanyag megfelelő volt, azonban a бүтүс felület javítási technológiáján változtatni kell.



6.13. ábra: Cső бүтүс felületének és tokvég palástjának javítása (Kép készült: 2012. 06. 12.)

2013. májusában vizsgált csövek közül az egyiken megfigyeltem, a tokvégnél egy kiálló feszítőhuzalt az üzem alatt levő csövön (6.14. ábra). A levált betonfedés szélén látható, hogy más, a cső anyagától eltérő szemszerkezetű anyaggal volt a levált rész kialakítva.



6.14. ábra: Tokvégnél kiálló feszítőhuzal (Kép készült: 2013. 05. 06.)

A cső környezetét átvizsgálva megtaláltam a csőről levált részt (6.15. ábra). Látható, hogy a javítóanyag alatt a feszítőbetét rozsdásodott. A rozsdatermék egy része a betonfedéssel együtt levált a csőről. A felületeket vizsgálva megállapítottuk, hogy a két eltérő anyag határfelületénél vált le a darab a csőről. Tehát nem volt megfelelő a javítóanyag tapadása az eredeti csőanyaghoz.



6.15. ábra: Tokvégről levált darab (Kép készült: 2013. 05. 06.)

6.2. Betonszilárdság egyenletességének ellenőrzése

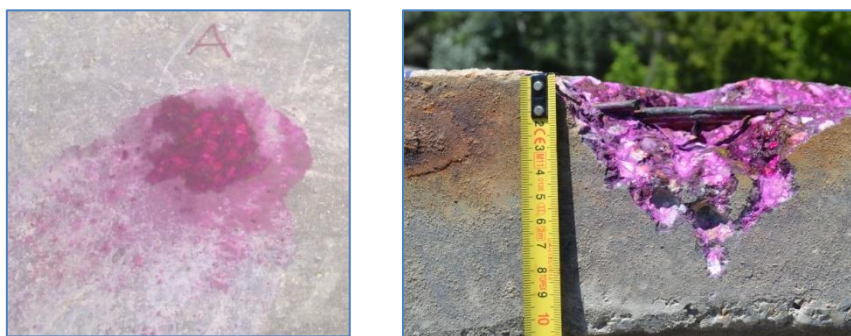
A betonszilárdság egyenletességét minden általunk megvizsgált csövön ellenőriztem. Két csövön elvégzett mérések eredményeit a 2. számú mellékletben (M.1. táblázatban és az M.2. táblázatban) közöltem.

A mérések alapján a csövek betonszilárdsága egyenletesnek mondható. Abban jelentős eltérést nem figyeltünk meg. A vizsgált csöveknél nem tapasztaltunk egyértelmű összefüggést a gyengébb szilárdságú részek és az észlelt rozsdafoltok között.

Ezek alapján feltételezhető, hogy a csövek állapotromlása elsősorban nem a beton szilárdságának csökkenésével magyarázható.

6.3. Karbonátosodási mélység vizsgálata

Az üzemén kívüli csövek vizsgálata során a betonfelületet megbontottam, és a frissen tört felületen fenolftalein oldattal megvizsgáltuk a karbonátosodási front mélységét. Ahogy a 6.16. ábrán látható, a karbonátosodási mélység legtöbb esetben nem érte el az acélbetéteket. Tehát az acélbetétek környezetében a pH érték > 9 -nél.



6.16. ábra: Karbonátosodás vizsgálata fenolftalein oldattal (Bal oldali kép készült: 2012. 07. 16., jobb oldali kép készült: 2013. 07. 22.)

Vizsgálataink során két olyan esetet figyeltünk meg, amelyiken a karbonátosodási front elérte a feszítőbetéteket.



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

A 6.7. ábrán ismertetet hosszanti rozsdafolt környezetét feltárva megfigyeltük, hogy az acélbetét nem lett a spirálhuzalrendező lécebe befűzve, így ott a betonfedés jelentősen lecsökkent, és a betonfedés is porózus volt. Ezen a részen a fenolftalein oldat nem színeződött el, tehát a pH érték 9 alá csökkent (6.17. ábra).

A 6.10. ábrán ismertetett repedés környezetét feltárva azt tapasztaltam, hogy a repedés a feszítőbetétekig tart. A repedés felülete fenolftalein oldat felhordása után nem színeződött el, tehát a repedés felületénél a beton pH értéke 9 alá csökkent. (Ez nem meglepő, hiszen a repedés felülete nem frissen tört felület, így a levegő CO_2 tartalma miatt karbonátosodott. Ez azonban azt jelenti, hogy az acélbetét ezen a részen depassziválódott.)



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

6.4. Kloridion tartalom vizsgálata nedves analitikai módszerrel

Az üzemén kívüli csövekből furatpor mintát vettem a pH érték, illetve a kloridion tartalom mennyiségi meghatározásához. A vizsgálatokat az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken Rónaky Viktória, a tanszék vegyész technikus a végezte el.

A mintavételi helyeket az M.1. ábrán, illetve az M.2. ábrán adtam meg. A mérési eredményeket az M.3. táblázatban és az M.4. táblázatban adtam meg. (A táblázatban feltüntetett vizsgálati eredményeknél a betű jelöli a mintavétel helyét, míg a „per” jel utáni szám a mintavétel mélységét.)

Minden mintavételi helyen két mélységből vettem furatport. A vizsgálatokhoz szükséges furatpor minta biztosítása végett egy vizsgálati helyen 4 furatot készítettem,

melyeket egybe gyűjtöttem (6.18. ábra). Ezzel csökkenteni tudtam a mintavételezés hibáit (pl.: nagyobb adalékanyagból vett minta, stb. kockázatát). Az 1. számú mintát 0-8 mm mélységből, a 2. számú mintát 8-20 mm mélységből vettem. (Abban az esetben, ha a mintavétel közben a fúrószár elérte a feszítőhuzalt, akkor addig a mélységig (hózzávetőlegesen 15 mm-ig történt a mintavétel. Ez a vizsgálat szempontjából elhanyagolható hibát jelent, hiszen az a kérdés, hogy az acélbetéteknél milyen kloridion tartalom van.)

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



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

Az 1/b helyen négy mélységből vettem 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 vettem.

Az M.3. táblázatban és az M.4. táblázatban „vastag” betűvel kiemeltem azokat az értékeket, ahol a feszítőbetét környezetében (az MSZ 4798-1:2004 szabvány által) megengedett, cement tömegére vonatkoztat 0,1 m% legnagyobb kloridion tartalmat megközelítette, illetve meghaladta a minta kloridion tartalma.

A mérési eredmények alapján az I. számú csőben (M.3. 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.

A nagy (M.1. ábra 3. számú) rozsdafoltjának környezetében vettem az L mintát, melyben a többi rozsdafoltnál mért értékhez képest kisebb kloridion tartalom volt. A nagy rozsdafolt (6.3. ábra) területén vett (V jelű) mintában kimagaslóan nagy kloridion tartalmat mutatott ki a laboratóriumi elemzés. Valószínűleg ez azzal magyarázható, hogy a nagy kiterjedésű rozsdafolt a zsaluillesztés mellett volt, ahol a gyártás közben kifolyt cementpép miatt porózusabb lett a beton. A porózusság növekedése miatt a kloridion jobban be tudott hatolni a feszítőbetétekig, mint a környező tömör betonstruktúrájú részekben.

Egyértelműen látható, hogy a gyártási hibáknál sokkal érzékenyebb a cső a környezeti hatásokra, mint a tömör részekben.

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

A II. számú csőből vett minták kloridion tartalma sehol sem érte le a 0,1 m% kloridion tartalmat a cement tömegére vonatkoztatva (*M.4. táblázat*).

Az *M.3. táblázat* és az *M.4. 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 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.

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 csövekről azt a tájékoztatást kaptam, 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 következtetek, hogy az I. számú cső volt az úttest alatt, míg a II. számú cső a füves terület alatt, mely magyarázhatja az eltérő állapotukat.

6.5. Betonfedés megbontásával elvégzett vizsgálatok

Az üzemen kívüli, kivett csődarabokon konzulenseim iránymutatása alapján feltárásokat végeztem, hogy a hibák körülményeit minél alaposabban tudjuk tanulmányozni.

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

6.5.1. Bütüs rész feltárása

A II. számú cső bütüs felületén tapasztalt rozsdafoltok (*6.19. ábra*) környezetében a betonfedést eltávolítottam.



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

A *6.20. ábrán* megfigyelhető, hogy a hosszanti feszítőbetétek majdnem a beton felületéig tartottak. A gyártástechnológiai leírással ellentétben a hosszbetétek kiérték a bütüs felületig. Végének kiégetését 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 dolgozták ki.



6.20. 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 tapasztaltam. (A megbontott felületen megvizsgáltam a karbonátosodási mélységet, mely nem érte el a feszítőhuzalokat.) Tehát a feszítőbetét korróziója nem az alacsony pH értéknek köszönhetően következett be.

6.5.2. Zsaluillesztés környezetének feltárása

Az I. számú cső zsaluillesztésénél észlelt nagy kiterjedésű rozsdásodás környezetében a betonfedést eltávolítottam (6.21. ábra). A rozsdafoltnál megbecsültem a keresztmetszet csökkenésének mértékét, majd százalékosan ábrázoltam az egyes feszítőbetétekre. A rozsdafolt vonalában, a cső alkotója mentén, teljes hosszban eltávolítottam a betonfedést, majd meghatároztam a betonfedés értékét. Az M.3. 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.



6.21. ábra: I. számú cső zsaluillesztésénél észlelt hibahely feltárása (Képek készültek: 2013. 07. 18.)

A zsaluillesztés környezetében több helyen megtaláltam a betonfelület alatt hozzávetőlegesen 1 cm-rel a tömítő szalagot (2.4. ábra). 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. Ennek következtében a beton ezeken a részeken porózusabb lehet, mely elősegítheti a kloridion, illetve a víz és oxigén feszítőbetétekig való behatolását.

Tehát a zsaluillesztések környezete fokozottan veszélyeztetett a környezeti hatásokkal szemben. Ha ehhez hozzávesszük a gyártási pontatlanságok miatt esetlegesen a tervezett 15 mm alá lecsökkent betonfedést, akkor megérthető, hogy miért tapasztaltunk több cső esetén is a zsaluillesztések környezetében rozsdafoltot.

6.5.3. Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzása

A 6.5. ábra jobb oldali képén látható rozsdafolt környezetét feltártam. A lehorgonyzó elem és a környezetében levő feszítőhuzal elkezdett korrodálni (6.22. ábra).

A bal oldali képen megfigyelhető, hogy elsősorban a cső бүтүс felületéhez közelebbi része károsodott a lehorgonyzó elemnek. Ebből arra következtetek, hogy a бүтүс felület irányából kezdődött meg a lehorgonyzó elem korróziója.

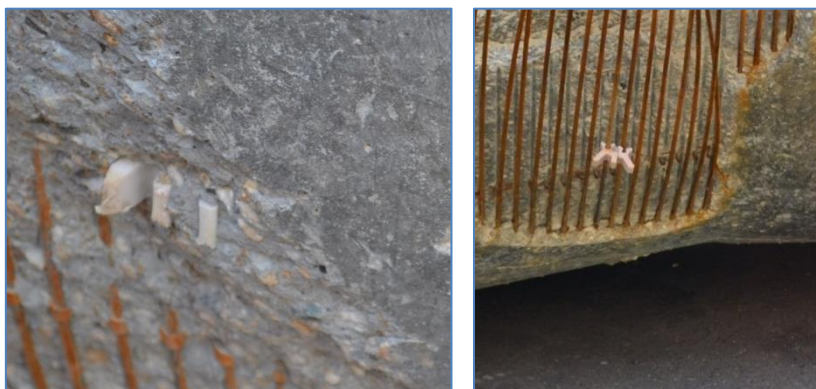


6.22. ábra: Spirálisan futó feszítőbetét véglehorgonyzása (Képek készültek: 2010. 11. 04.)

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

6.5.4. Távtartók környezetének vizsgálata

Az általunk vizsgált egyik cső héjkitöréssel ment tönkre, így a megmaradt csőelemen lehetőségünk volt megvizsgálni a szabaddá vált műanyag távtartók környezetét (6.23. ábra). A műanyag távtartók környezetében nem figyeltem meg a cső üzeme közben kialakult rozsdásodást. (A csőtörés hatására az acélbetétek helyenként szabaddá váltak, így a szabadlevegőn a nagy mennyiségű víz hatására egy vékony rozsdaréteg keletkezett, mire a cső vizsgálatát elvégezhettem.) Más csőelemeken végzett feltárásoknál semmilyen rozsdásodást nem figyeltünk meg a távtartók környezetében.



6.23. ábra: Csőtörés során szabaddá vált műanyag távtartók környezete (Képek készültek: 2012. 08. 03.)

6.5.5. Toknyak iránytörésének vizsgálata

A 6.21. ábrán látható feltárás során meghatároztam az I. szám cső toknyakánál (cső iránytörésénél) levő betonfedés nagyságát. Az iránytörésnél a spirálisan futó feszítőhuzal 50. menete volt (a tok végétől számítva). Az M.3. ábrán megfigyelhető, hogy a 47. menettől kezdődően a betonfedés jelentősen lecsökkent, azonban még a Műszaki Előírásban meghatározott 12 mm-t meghaladta. Az 52. menetet követően (az iránytöréstől hozzávetőlegesen 3 cm távolságra) a betonfedés 12 mm alá csökkent.

Egy tönkrement cső esetén is megvizsgáltuk a betonfedéseket a toknyak környezetében. Az M.4. ábrán megfigyelhető, hogy pont a toknyak környezetében nő meg a betonfedés.

A méréseim alapján megállapítottuk, hogy a toknyak környezetében nehezen lehetett tartani a tervezett betonfedést. Tehát annak ellenére, hogy a vizsgált csövek esetén nem figyeltem meg rozsdásodást közvetlenül a toknyak környezetében, a betonfedés bizonytalan tartása miatt a toknyak környezete is fokozottan veszélyeztetett a korrózió szempontjából.

6.5.6. Cső további részein észlelt rozsdásodások

A II. számú cső szárvégénél észlelt hosszanti rozsdafolt (6.7. ábra) környezetét feltártam. A feltárás során megfigyeltük, hogy a spirálisan futó feszítőhuzal egy ponton nem volt befűzve a spirálhuzalrendező lécebe (6.24. ábra). Ennek következtében a feszítőhuzal elmozdult. Lokálisan a feszítőbetét betonfedése lecsökkent. Az előírt 12 mm helyett a betonfedés 3,51 mm volt, illetve a betonfelület porózus volt. Vizsgálataink alapján a karbonátosodási mélység elérte a lecsökkent betonfedéssel rendelkező részen a feszítőbetétet, így az acélbetét depassziválódott. A lecsökkent betonfedéssel rendelkező részen a spirálisan futó feszítőhuzal korrózióját figyeltem meg.

A spirálisan futó feszítőhuzal szomszédos meneteinél, ahol a spirálhuzalrendező lécebe be volt fűzve a feszítőhuzal (biztosított volt az előírt betonfedés) az acélbetétek teljesen épek voltak, ott nem érte el a karbonátosodási front az acélbetétet. Tehát az észlelt hibának lokális jellegű elváltozás volt az elsődleges oka.

A 6.8. ábrán ismertetett rozsdafolt környezetét feltártam. A feltárás során azt tapasztaltuk, hogy egy ponton a spirálisan futó feszítőbetét keresztmetszete teljes egészében megszűnt. A 6.25. ábrán látható, hogy a spirálisan futó feszítőhuzal az 1. számú 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 a 6.8. ábrán látható jelentős méretű pórusokon keresztül a kloridion, illetve a víz és oxigén bejutott a feszítőhuzalig, és annak lokális korrózióját okozta.



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



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

A 6.10. ábrán látható rozsdafolt, illetve a rozsdatermék eltávolítását követően megfigyelt repedés környezetét feltártam. Azt tapasztaltuk, hogy a repedés alatt a spirálisan futó feszítőhuzal sűrűn volt feltekercselve (6.26. ábra). (Nem volt mérhető távolság a spirálisan futó feszítőhuzal egymást követő 4 menete között.) Továbbá a feltáráskor megfigyeltük, hogy a bütös felületen a hosszanti acélbetét vége jelentősen korrodálódott.

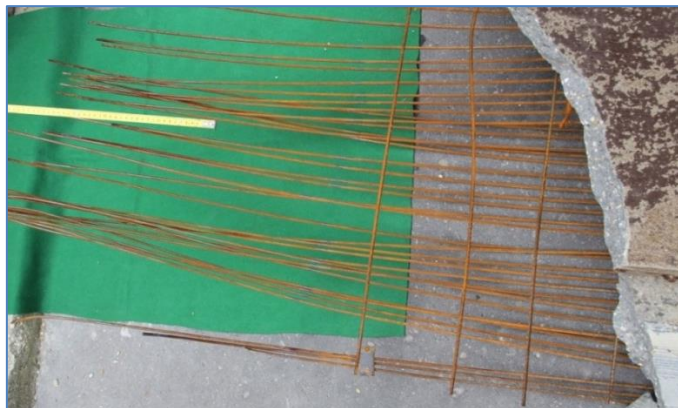
A repedés belső felülete karbonátosodott a spirálisan futó feszítőhuzal mélységéig. Tehát a feszítőhuzal depassziválódott.



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

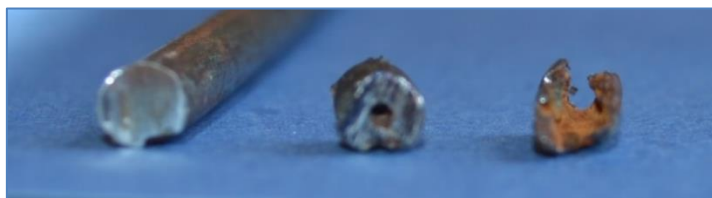
6.5.7. Feszítőbetét fogyasztásának vizsgálata

Az általam vizsgált, héjkitöréssel tönkrement cső spirálisan futó feszítőhuzalja 43 helyen szakadt el (6.27. ábra). A spirálisan futó feszítőhuzalon lyukkorrózió jeleit figyeltem meg.



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

A tönkrement spirálisan futó feszítőbetétet egyik részét 1 cm-es darabokra vágtam, így megfigyelhető volt a feszítőhuzal közepén kialakult lyuk (6.28. ábra).



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

6.6. Furatpor minták elemzése fázisanalitikai módszerrel

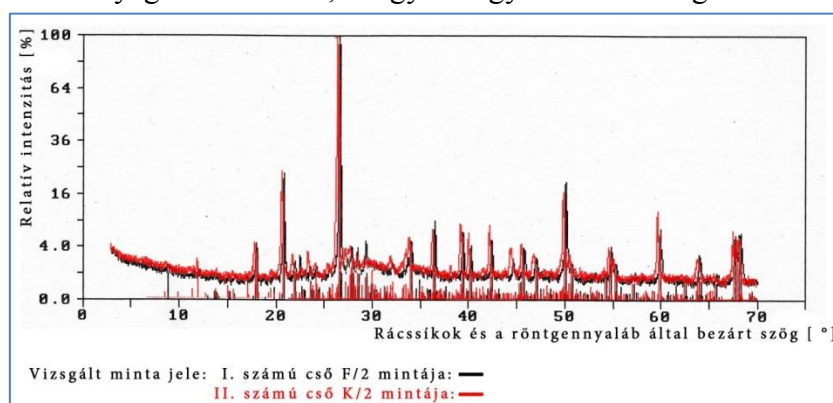
A korábbiakban többször tárgyalt I. számú cső és II. számú cső állapota jelentősen eltért, annak ellenére, hogy egymástól néhány tíz méterre voltak beépítve. Az I. számú csőben

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.

6.6.1. Röntgendiffrakciós vizsgálat

A két minta röntgendiffraktogramjait közös koordináta-rendszerben ábrázoltam (6.29. 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.



6.29. ábra: Az I. és II. cső mintáinak röntgendiffraktogramja

A röntgendiffraktogramokon azonosított elemeket az 5. számú melléklet M.5. táblázatban, illetve az M.6. 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.

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).

A vashidroxid kimutathatósága azt jelenti, hogy az I/F/2 mintavételi helyen (a rosszabb állapotú csövön) korróziós termék volt. A brownmillerit (tetra-kalcium-aluminát-ferrit, szilikátkémiai képlettel: C_4AF) 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 tri-kalcium-alumináté (szilikátkémiai képlettel: C_3A). A brownmillerit a szulfátálló cementekben van jelen nagyobb arányban, pl. a korábbi cementjelöléseknek megfelelően az ún. S 54-es cementben.

A rosenhahnit kristályos tri-kalcium-szilikát-hidrát, a tri-kalcium-szilikát (szilikátkémiai képlettel: C_3S) 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.)

6.6.2. 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 tömegvesztesség változásának sebessége és hőmérsékletváltozás sebessége alapján jellemző lépcsőket lehet meghatározni.

Az 5. számú melléklet M.5. ábráján az I/F/2 minta derivatogramja látható. Az I. mintánál az 1. TG lépcsőnél tapasztalható jelentős tömegvesztesség dehidratáció miatt következett be. Ebben a tartományban következik be a fizikai víz és az ettringit (kalcium-aluminát-szulfát-hidrát) vizének elvesztése.

A 2. TG lépcső a portlandit (Ca(OH)_2) hidroxil csoportok formájában, azaz kémiaiilag kötött vizének elvesztését mutatja. A hőreakció során a $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ átalakulás megy végbe, melynél a vízvesztesség 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: $2,21\text{m\%} \times 2,27 = 5,0$ 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 adja meg, ami 9,3 m% volt.

Az 5. számú melléklet M.6. ábráján 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 vizének 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.

A 3. TG lépcső a kémiaiilag kötött víz (portlandit, azaz a Ca(OH)_2 vizének) elvesztését mutatja. A hőreakció során a $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ átalakulás megy végbe, melynél a vízvesztesség alapján meg lehet határozni, hogy $0,70 \text{ m\%} \times 4,12 = 2,9 \text{ m\% Ca(OH)}_2$ 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: $1,65 \text{ m\%} \times 2,27 = 3,8$ volt.

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

6.6.3. Furatpor minta fázisanalitikai elemzésének megállapításai

A röntgendiffraktogramok hasonló eredményeket adtak. 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 van.

A derivatogramok alapján látható, hogy a portlandit és a kalcium-karbonát mennyisége kismértékben eltért egymástól. Mindkét betoncsőre megállapíthatjuk, hogy a cementkőben van még portlandit, de ennek a hidrátterméknek, valamint a karbonátosodás során a belőle képződő kalcit mennyisége is eltér. A rosszabb állapotú I. számú csőben több 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.

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

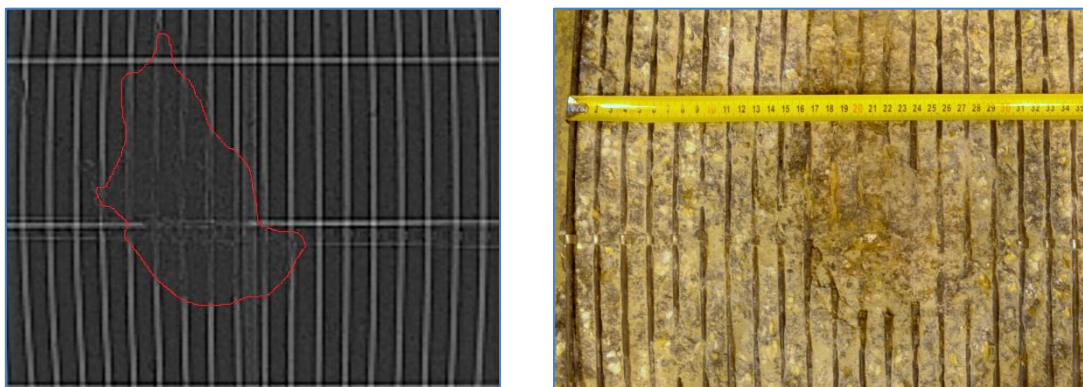
6.7. CT vizsgálat eredményei

Két üzemén kívüli csőből kivágtak olyan részeket, melyen jelentős kiterjedésű rozsdafolt látszott (6.30. ábra). A CT felvételen jól látható, hogy a rozsdafolt alatt a spirálisan futó feszítőhuzal 8 meneténél megszűnt a teljes feszítőhuzal keresztmetszet.



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

A CT vizsgálatot követően a betonfedés eltávolításával ellenőriztem a CT felvételeken tapasztaltakat (6.31. ábra). Feltáráskor a felvételnek megfelelő állapotban találtam a feszítőbetéteket.



6.31. ábra: Vizsgált minta CT modellje és betonfedés eltávolítását követő képe (CT modellt készítette: Földes Tamás, betonfedés feltárását én végeztem: 2012. 11. 23-án)

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 a 6.8. ábrán, illetve a 6.9. ábrán bemutatott nagy méretű pórusok ténylegesen leérnek-e a feszítőbetétekig, vagy sem.

Nagy hátránya azonban az eljárásnak, hogy jelenleg nincs mobil CT, amivel üzem alatt levő csöveket is vizsgálni lehetne. Ennek megfelelően az üzemén kívüli csőből ki kell vágni a megvizsgálandó darabot, majd be kell szállítani az egyik olyan intézménybe, ahol lehetőség van ilyen próbatestek CT vizsgálatára. Ez viszonylag körülményessé és időigényessé teszi a vizsgálatot.

7. JAVASLATOK A KÉSŐBBI ÁLLAPOTVIZSGÁLATOKHOZ

Az eddigi vizsgálatok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a csöveken keletkezett hibahelyek legtöbbször ott alakultak ki, ahol a betonfedés lecsökkent, illetve ahol a beton porózusabb volt, mely feltehetően a gyártáshibákra vezethetők 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 a környezeti hatások voltak. Sok esetben a betonba bejutó kloridion jelentősen felgyorsította a leromlási folyamatot. Míg más esetekben a Sentab cső környezetében levő másik cső sérülése miatt a cső környezete átnedvesedett, így a Sentab csövet alátámasztó beton „vályú” megsüllyedése eredményezte a cső tönkremenetelét.

Az utak síkosság mentesítését leginkább nátrium-kloriddal (NaCl) végzik, illetve végezték, mely utána 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. Ellenőriztük, 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.

Ebből arra következtetünk, hogy nagyon fontos a mintavételi helynek a körültekintő kiválasztása. Ha az a célunk, hogy a csőszakasz állapotára vonatkozóan releváns következtetést lehessen levonni a vizsgálatból, akkor a legrosszabb állapotú csöveket kell az állapotvizsgálathoz kiválasztanunk. Ennek meghatározásához fontos a csöveket ért hatásokat ismernünk, melyek a gyártás, telepítés, illetve üzemeltetés közben érték a csövet.

Noha organizáció szempontjából egyszerűbb az út mellett húzódó járdaszigeteknél, zöldterületeknél elvégezni a csőszakasz feltárását. Az itt vett eredmények lehet, hogy nem lesznek mérvadóak a vizsgált csőszakasz legrosszabb állapotú részének állapota szempontjából, hiszen általában a zöldterületek kisebb sóterhelést kapnak, mint a forgalmas közutak. A talajba jutó só, illetve víz mennyisége szempontjából egyáltalán nem elhanyagolható az útburkolat fajtája, illetve jelenlegi állapota sem. Feltehetően egy kockakő, vagy egy díszburkolat esetén nagyobb mennyiségű só, illetve csapadék juthat a talajba, mint egy jó állapotú aszfalt burkolat esetén. A burkolat hibahelyein lokálisan nőhet meg a talajba jutó sóoldat és csapadék mennyisége, így csak lokálisan rontva a csőszakasz állapotát. A kis kiterjedésen jelentkező koncentrált kloridion tartalom növekvés nehezen detektálható, így fokozott veszélyt jelenthet a Sentab csövek állapotára.

javasolom, hogy a vizsgált csőszakaszon az állapotfelméréshez végzendő feltárások helyét a következők figyelembe vételével jelöljék ki a továbbiakban:

- a síkosság mentesítés módjától és gyakoriságától,
- útburkolat fajtájától (aszfalt, kockakő, díszburkolat),
- az útburkolat korábbi és jelenlegi állapotától,
- terület csapadékvíz elvezetésének módjától és állapotától,
- talaj, illetve talajvíz adottságaitól,
- cső beépítési körülményeitől (elhelyezték-e beton vályút, vagy sem),
- cső beépítésének időpontjától,
- cső átmérőjétől és üzemi víznyomásától,
- környező közműhálózatok vélhető állapotától,
- korábbi feltárások eredményétől.

Feltételezhetően ugyanis, hogy az ezek alapján legrosszabbnak tűnő részen találhatók a vizsgált csőszakaszon az állapotvizsgálat szempontjából releváns csőelemek.

8. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A Sentab csövek állapota nagy jelentőséggel bír, hiszen hazánkban hozzávetőlegesen 360 km Sentab csövet gyártottak, illetve építettek be 1969 és 1990 között. A Sentab csöveket több nagyobb településen is alkalmazták az ivóvíz-, illetve csatornahálózatban. Ebből Budapesten hozzávetőlegesen 120 km található.

Az elmúlt 3 év alatt, amióta Sentab csövek állapotvizsgálatával foglalkoztam 8 üzem alatti csőelemet és 10 kiemelt, üzemén kívüli csőelem vizsgálatában vettem részt. Ezen vizsgálatok összes mérési eredményének ismertetése meghaladná a TDK dolgozat kereteit, így azokból a jellemző leromlási folyamatokat választottam ki ismertetésre.

Az üzemben lévő csöveken a következő vizsgálatok elvégzésébe közreműködtem:

- 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 következőket végeztem 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,
- kijelölt rozsdafoltok vizsgálatát CT (Computer Tomography, azaz számítógépes tomográfia) segítségével,
- furatpor minta elemzését fázisanalitikai módszerrel (röntgendiffrakciós és derivatográfiás vizsgálattal).

Konzulenseimmel végzett vizsgálataink alapján a beton alapvetően kielégítő minőségű volt, azonban egyes csöveken jelentős állapotromlást (főként acélkorróziót) tapasztaltunk.

Vizsgálataink alapján az alkalmazott **betonnal kapcsolatban** a következő megállapításokat tesszük:

- **a beton szilárdsága egyenletesnek tekinthető** a Schmidt-kalapáccsal végzett vizsgálataim alapján. Helyenként a szilárdság kis mértékben eltért az átlagtól, azonban **nem tapasztalható egyértelmű összefüggést a szilárdságváltozás és a vizsgált csöveken tapasztalt korróziós helyek között,**
- a gyártástechnológia tanulmányozása közben fény derült arra, hogy **S54 típusú szulfátálló cementet alkalmaztak** a Sentab csövek gyártásához, melynek trikálcium-aluminát (C₃A) tartalma kicsi volt. Ez a beton **szulfátállósága szempontjából kedvező, azonban a kloridion megkötő képessége így kisebb** a cementkönek, mint tiszta portland cement felhasználása esetén.

Vizsgálataink alapján a **spirálisan futó feszítőhuzalok** korróziójával kapcsolatban konzulenseimmel a következő megállapításokat tesszük:

- **a tok iránytörésénél nem tapasztaltunk rozsdásodást** egyik cső esetén sem, azonban a **betonfedések ellenőrzése során** konzulenseimmel **megállapítottuk, hogy a tok iránytörésénél nehezen lehetett betartani az előírt betonfedést,** mely felgyorsíthatja a Sentab csövek állapotromlását,
- több vizsgált cső esetén észleltünk a **zsaluillesztés vonalában jelentős kiterjedésű rozsdafoltokat.** Az egyik cső zsaluillesztése mellett a cső egész alkotója mentén eltávolítottam a betonfedést. Több helyen hozzátétőlegesen **1 cm mélységben a beton felülete alatt megtaláltam a gyártáskor használt tömítő szalagot.** Tehát a tömítő szalag és a zsalu közé tudott jutni a beton.

Ezzel felmerül annak lehetősége is, hogy a **zsaluillesztésen a cementpép esetenként kifolyhatott** a cső gyártása során. A beton ezeken a részeken porózusabb lehet, mely **elősegítheti a kloridion, illetve a víz és oxigén feszítőbetétekig való behatolását.**

A zsaluillesztésnél tapasztalt egyik rozsdafoltból vett mintában hozzávetőlegesen 2,1 m% kloridiont mutatott ki a laboratóriumi vizsgálat a feszítőbetét mélységében, a cement tömegére vonatkoztatva. (Az MSZ 4798-1:2004 szabvány, hasonló szerkezetekre a cement tömegére vonatkoztat 0,1 m% legnagyobb kloridion tartalmat enged meg.) A karbonátosodási mélység vizsgálata alapján a karbonátosodási front nem érte el a spirálisan futó feszítőbetétet. Ebből arra következtetek, hogy a vizsgált csövön a zsaluillesztés porózusabb betonján keresztül bejutott, nagy mennyiségű kloridion miatt következett be a feszítőhuzal korróziója,

- az egyik Sentab cső vizsgálatkor egy olyan rozsdafoltot figyeltem meg, amelynél a beton felülete nagyon porózus volt. A betonfedés eltávolítását követően megállapítottam, hogy a **spirálisan futó feszítőhuzal egy ponton nem volt befűzve a spirálhuzal rendező lécebe**, melynek hatására el tudott mozdulni a gyártás közben. A **betonfedés 3,51 mm-re lecsökkent.** A vizsgálatok alapján a kloridion tartalom a megengedett határérték alatt volt, azonban a **karbonátosodási mélység elérte a feszítőbetétet.** Ebből arra következtetek, hogy **egyes lokális hibahelyeknél olyan mértékben lecsökkenhet a betonfedés, illetve olyan porózus lehet a beton szerkezete, hogy a pH érték lecsökkenésével depassziválódik a feszítőhuzal,**
- több rozsdafoltnál, a **rozsdatermék eltávolítását követően nagy méretű pórust figyeltünk meg.** Feltételezéseim alapján a porózus betonstruktúra jelentősen **elősegíthette a kloridion, illetve a víz és oxigén feszítőbetétekig való bejutását**, mely lokális rozsdásodáshoz vezetett,
- a spirálisan futó feszítőbetétek műanyag távtartóinak környezetét vizsgálva, konzulenseimmel megállapítottuk, hogy semmilyen korróziós nyom nem található. Ezek alapján azt feltételezem, hogy a **műanyag távtartók nem játszanak közvetlen szerepet a Sentab csövek állapotromlásában.** A műanyag távtartó elemek nem megfelelő elhelyezése miatt kialakuló **egyenlőtlen betonfedés viszont jelentős hatással lehet a csövek leromlási folyamataira,**
- több csövön is megfigyeltük a cső tokjának végéhez közel, a cső palástján egy jellegzetes rozsdafoltot, melynek feltárásakor látható volt a **spirálisan futó feszítőhuzal véglehorgonyzó elemének korróziója.** Elsősorban a cső бүтүс felületéhez közelebbi része károsodott a lehorgonyzó elemeknek. Ebből arra következtetek, hogy **feltehetően a бүтүс felület irányából kezdődött meg a lehorgonyzó elem korróziója.** A friss törési felületen ellenőriztem, hogy a karbonátosodási mélység nem érte el a feszítőbetétet, illetve a lehorgonyzó elemet. **Feltehetően a betonba bejutott kloridion hatására kezdődött meg a lehorgonyzó elem korróziója.**

Vizsgálataink alapján a **hosszanti feszítőhuzalok** korróziójával kapcsolatban konzulenseimmel a következő megállapítást tettük:

- megfigyeltük a **cső бүтүс felületén a hosszanti feszítőhuzalok végének rozsdásodását**. A vizsgálataim alapján a karbonátosodási mélység nem érte el a hosszanti feszítőbetétek rozsdásodott részének belső részét. A feltárás során arra a következtetésre jutottam, hogy nagy valószínűséggel a **megvizsgált (1973-1974 között gyártott) csövek esetén a hosszanti feszítőbetét végét nem a Műszaki Előírásban szereplő módon alakították ki**. Elképzelhető, hogy a Műszaki Előírásban szereplő korrózióvédelmi módot, a vizsgált csövek gyártását követő években határozták meg. Azonban a **hosszanti feszítőhuzal végének korróziója azonban jelenleg egyik vizsgált cső esetén sem okozta volna annak tönkremenetelét**.

Vizsgálataim alapján a **későbbi állapotvizsgálatok kapcsán végzendő feltárásokhoz** a következő javaslatot teszem:

- megvizsgáltam **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. Ellenőriztem, 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, mint a füves terület alól kivett csövön**. Arra a következtetésre jutottam, hogy a **cső állapota rövid szakaszon belül is jelentősen eltérhet egymástól**. Ezek alapján nagy körültekintéssel kell kijelölni a későbbi állapotfelmérések kapcsán végzendő feltárások helyét. Noha organizáció szempontjából egyszerűbb az út mellett húzódó járdaszízeknél, zöldterületeknél elvégezni a csőszakasz feltárását. Az itt vett eredmények lehet, hogy nem lesznek mérvadóak a vizsgált csőszakasz legrosszabb állapotú részének állapota szempontjából. **Javasolom, hogy az állapotfelméréshez végzendő feltárásokat a vizsgált csőszakasz leginkább sózott, legrosszabb útburkolati állapotú részén végezzék, illetve azokon a részeken, ahol hosszabb időn keresztül fennállt ilyen állapot, függetlenül attól, hogy még mindig fennáll-e ez a körülmény**. Feltételezhetően ezeken a részeken található a vizsgált csőszakaszon a legrosszabb állapotú részek.

Tehát a TDK dolgozatomban meghatároztam a Sentab csövek jellemző hibahelyeit és az ott észlelt hibák valószínűsíthető okait. Az elvégzett vizsgálatok alapján iránymutatást adtam a további, állapotfelmérés szempontjából releváns feltárási helyek kiválasztásához.

10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

Külön köszönöm konzulenseimnek,

- Dr. Balázs L. Györgynek,

- Dr. Majorosné Dr. Lublőy Évának,
- Zimmer Péternek,

akik a vizsgálatok végzésében és elemzésében komoly segítséget nyújtottak. Iránymutatásukkal és szakértelmükkel segítették tudományos munkám elkészítését.

Köszönöm Rónaky Viktória segítségét a furatpor minta kloridion tartalmának meghatározásában, illetve a fázisanalitikai vizsgálatok elvégzésében.

Köszönöm Dr. Kopecskó Katalin szakmai segítségét a fázisanalitikai vizsgálatok kiértékelésében és a kémiai folyamatok megértésében.

Továbbá köszönöm:

- Dr. Nehme Salem Georges,
- Dr. Seidl Ágoston

segítségét, akik szakmai tanácsaikkal is elősegítették munkámat.

Továbbá köszönöm az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéknek a vizsgálatokhoz biztosított berendezéseket, műszereket.

11. FELHASZNÁLT IRODALOM

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)

Balazs Gy. (1995): „Beton és vasbeton II., Mélyépítési beton- és vasbeton szerkezetek története”, ISBN 963 05 6884 5, Akadémiai Könyvkiadó, pp. 752

Balázs L. Gy., Borosnyói A. (2011): „Oktatási segédlet, Építőanyagok – MSc.”, BMEEOEMMST7, p. 152, http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOEMMS_T7 (letöltve: 2013. 04. 07.)

Balázs Gy., Erdélyi A., Kovács K. (1991): „A betonacél korróziója kloridok hatására”, *Építőanyagok*, 1991/6, pp. 202-219.

Borosnyói, A. (2013): „Tartósság, teljesítőképesség, fenntarthatóság”, *Építőanyagok – MSc. előadás*, p. 75., http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOEMMS_T7 (letöltve: 2013. 03. 25.)

Breit, W. (1997): „Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden 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_kemia_oktatasi_segedanyag.pdf (letöltve: 2013. 09. 14.)

Drescherné H. A. (2004): „A Mohácsi Üzemvezetőség”, *DRV Hírek*, http://www.driv.hu/drv/drv_files/File/DRV%20H%E9rek/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 49 (2009): „Corrosion protection of reinforcing steel”, Technical report prepared by Task Group 9.7, ISBN 978-2-88394-089-5, p. 116.
- 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, p. 63.
- Fogarasi Gy. (1981): „A feszített vasalás technológiája”, ISBN 963 431 330 2, Budapesti Műszaki Egyetem Mérnöki Továbbképző Intézete, Budapest, p. 161
- Fogarasi Gy. (1986): „Prestressed Concrete Technology”, ISBN 963 05 4206 4, Akadémia Kiadó, Budapest, p. 317.
- Fővárosi Vízművek Zrt. (2012): „Fővárosi Vízművek 2012 éves jelentés”, pp. 34,
http://vizmuvek.hu/files/public/Fovarosi_vizmuvek/tarsasagi_informaciok/FVM_Eves_Jel_HUN.pdf (letöltve: 2013. 07. 05.)
- Fővárosi Vízművek Kommunikációs osztálya: „Referencia kiadvány”, D-Plus Nyomda, pp. 40,
http://vizmuvek.hu/files/public/Fovarosi_vizmuvek/tarsasagi_informaciok/kiadvanyok/referencia-magyarweb.pdf (letöltve: 2013. 07. 05.)
- Fürtös A. (2011): „Víziközmű vagyonerőtelítés 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.)
- Hartl, G.: Chloridkorrosion Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins des Österreichischen Zementfabrikanten, Heft 37, pp 21-53
- Kausay T. (2013): „Beton, a betonszabvány néhány fejezetének értelmezése”, Oktatási és továbbképzési kiadvány, Mérnöki Kamara Nonprofit Kft., ISBN 978-963-88358-4-0, Budapest, p. 334.
- Károlyi A., Tolnai B. (2008): „Víz-rajz 140 éve a főváros szolgálatában”, Fővárosi Vízművek, Keskeny Nyomda, pp. 98, <http://vizmuvek.hu/jubileum/pics/konyv.pdf> (letöltve: 2013. 07. 10.)
- 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: Dr. Balázs György, 2004. 06. 10., p. 83.
- 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: Dr. Balázs György, prof. emeritus, pp. 100.
- Kopecskó K.: „Fázisanalitikai módszerek alkalmazása a mérnöki gyakorlatban”,
http://www.epito.bme.hu/eat/dolgozok/feltoltesek/kopecskok/fazisanalitikai_modszerek.pdf, (letöltve: 2013. 10. 07.)

- Lublóy, É. (2012): „CT komputer tomográfia mérnöki alkalmazási lehetőségei”, Szerkezetek diagnosztikája – MSc. (BMEEOEEMMAT1) előadás, 2012. 05. 02., p. 21., http://www.epito.bme.hu/eat/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOEEMMAT1, (letöltve: 2013. 05. 14.)
- Majorosné Lublóy É. E. (2011): „CT alkalmazási lehetőségei a beton roncsolásmentes vizsgálatainál”, Diplomamunka, Szerkezetépítő Szakirányú Továbbképzés, Betontechnológia Ágazat, p. 77.
- Mester, J. (1978): „BVM – SENTAB nyomóvezetékek, Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium Műszaki Előírás, Építésügyi Tájékoztatási Központ Nyomdaüzeme, Azonossági szám: 579/77, p. 138
- 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 4798-1:2004: Magyar Szabványügyi Testület: „Magyar Szabvány, Beton 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon”, ICS 91.100.30, 2004. szeptember, p. 170.
- panoramio.com: „Orlay utca 2012. 07. 01. (Csőtörés után)”, <http://www.panoramio.com/photo/75023253> (letöltve: 2013. 09. 13.)
- Pluzsik T. (Szerkesztő), Szerzők: Csányi E., Czirják J., Kovács K., Migály B., Pluzsik T., Nehme S. G., Kleine Cs., 2013: „Szulfátálló cementek kézikönyve”, Holcim Magyarország Kft., Premier Nyomda Kft., p. 92.
- 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
- sulinet.hu: „Szeged korszerű vízellátása”, http://www.sulinet.hu/oroksegtar/data/tudomany_es_ismeretterjesztes/Szeged_varos_vize_llatanak_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.)
- Tuutti K. (1982): „Corrosion of steel in concrete”, Forskning Research Stockholm, pp 4-82.
- vizmuvek.hu: „Vízminőség, vízkeménység”, http://vizmuvek.hu/hu/fovarosi-vizmuvek/lakossagi-ugyfelek/altalanos_informaciok/vizminoseg_vizkemenyseg (letöltve: 2013. 08. 12.)