



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR**

SZATHMÁRI ESZTER

ÉPÍTŐMÉRNÖK HALLGATÓ (B. Sc.)

**BETONSZERKEZETEK HASZNÁLATI ÉLETTARTAM ALAPÚ
TERVEZÉSÉNEK TARTÓSSÁGI SZEMPONTJAI**

TDK DOLGOZAT

Konzulens: Dr. Kovács Tamás, adjunktus

Tartalom

Bevezetés	3
1. A használati élettartam és tartósság értelmezése	4
2. Betonszerkezetek használati élettartam alapú tervezésének elve.....	5
3. A használati élettartam alapú tervezés különböző szintjei.....	7
4. A betonszerkezetek megbízhatóságának kezelése a használati élettartam során	8
5. A használati élettartam alapú tervezés tartóssági kérdéseinek előzménye	11
6. Betonszerkezetek tartósságra való tervezésének módszere	13
6.1. Karbonátosodás által okozott korrózió vizsgálata repedésmentes beton esetén	13
6.1.1. Teljes valószínűségi eljárás.....	13
6.1.2. Parciális tényezők módszere	22
6.2. Kloridok által okozott korrózió vizsgálata repedésmentes beton esetén	25
6.2.1. Teljes valószínűségi eljárás.....	25
6.2.2. Parciális tényezők módszere	32
6.3. Fagyási/olvadási károsodás jégolvasztó anyag nélkül – repedésmentes beton esetén	32
6.3.1. Teljes valószínűségi eljárás.....	32
6.3.2. Parciális tényezők módszere	35
6.4. Fagyás és jégolvasztó sók által okozott felületi kérgesedés – repedésmentes beton esetén	
35	
6.4.1. Teljes valószínűségi eljárás.....	35
7. A használhatósági határállapottól a teherbírési határállapotig	39
8. A módszer alkalmazása	44
9. Összefoglalás, elért eredmények	51
Irodalomjegyzék	53
Táblázatok.....	54
Számítási melléklet	55

Bevezetés

Jelen dolgozat a betonszerkezetek tartóssági kérdéseit, a szerkezetek tartósságra való tervezését vizsgálja. A mai tervezési gyakorlatban teherbírasi, használhatósági és tartóssági követelményeket támasztunk építményeinkkel szemben. A tervezés során zárt képletekkel igazoljuk, hogy a megtervezett szerkezet teljesíti a teherbírasi és használhatósági igényeket, ám tartóssági szempontból nem áll rendelkezésre ilyen számszerűsített követelmény. A szabványok ajánlott értékei alapján veszünk fel adott szilárdsághoz és megbízhatósági szinthez egy-egy betonfedés értéket. Ezek a számok tapasztalatok és megfigyelések eredményei. A tartósság kérdése azonban ennél jóval fontosabb, nagyobb szerepe van a tervezett használati élettartam alatti megbízhatóságban.

A dolgozatomban a tartóssági követelmények ellenőrzésére mutatok be egy olyan eljárást, amely a tartósságot befolyásoló környezeti hatásokat valós modellek alapján, számszerűsített formában kezeli. A tervezési eljárás, a befolyásoló paraméterek és a valószínűségi változók kezelése mellett konkrét szerkezeteken mutatom be a módszert.

Emellett a tárgyalt eljárásnak és a szerkezet kívánt megbízhatóságának összekapcsolásával a tartóssági tervezés használati élettartamra való optimalizálását bemutatom.

Zárásként az elért eredményeket összegzem, illetve a továbbfejlesztés lehetőségeit tekintem át.

1. A használati élettartam és tartósság értelmezése

A **tervezett használati élettartam** egy olyan feltételezett *időintervallumot* jelent, amelyen belül az adott szerkezet, vagy annak eleme rendeltetésszerűen használható anélkül, hogy az előre meghatározott karbantartási munkákon kívül egyéb nagyszabású javítási, megerősítési feladat válna szükségessé. A tervezett használati élettartam függ az adott szerkezet funkciójától, elhelyezkedésétől, és anyagától is. Az élettartam – illetve az időintervallum vége – többféle módon adható meg:

- ◆ a használati élettartam végét jelentő határállapot definiálásával
- ◆ az időintervallum évei számának megadásával
- ◆ a szerkezet megbízhatósági szintjének kijelölésével, melynek átlépése jelenti a használati élettartam végét

A tervezési élettartamok alapján az EuroCode a következőképpen osztályozza a szerkezeteket [2]:

Osztály	Előírt tervezési élettartam [év]	Példák
1	10	Ideiglenes tartószerkezetek
2	10-25	Cserélhető tartószerkezeti részek, pl. darupályatartók, saruk
3	15-30	Mezőgazdasági és hasonló tartószerkezetek
4	50	Épületek tartószerkezetei és egyéb szokásos tartószerkezetek
5	100	Monumentális épületek tartószerkezetei, hidak és más építőmérnöki szerkezetek

1. táblázat: Tervezési élettartamok

A **szerkezet tartóssága** azt jelenti, hogy rendeltetésszerű használatra alkalmas marad egészen a tervezett használati élettartam végéig. Ennek figyelembe vétele több módon – az alábbi lehetőségek akár együttes alkalmazásával is – történhet:

- ◆ védő- csillapító rendszerek tervezésével
- ◆ olyan anyagok alkalmazásával, melyek megfelelő karbantartás mellett nem mennek tönkre a tervezett használati élettartam végéig
- ◆ olyan szerkezeti méretek, anyagmennyiségek alkalmazásával, melyek a károsodást a tervezett használati élettartam alatt kompenzálják
- ◆ olyan szerkezeti elemek alkalmazásával, melyek rövidebb élettartamúak, ám a tervezett használati élettartam alatt egy vagy több alkalommal egyszerűen cserélhetők

A fenti intézkedéseknek mind összhangban kell lenniük a megfelelő - környezeti tényezőktől függő, vagy fix időtartamú - ellenőrzésekkel, karbantartási tevékenységgel. Emellett ügyelni kell arra, hogy a rövid- és hosszú távú megbízhatósági követelmények minden esetben megfeleljenek egymásnak.

2. Betonszerkezetek használati élettartam alapú tervezésének elve

A használati élettartam alapú tervezés a korábban alkalmazott – döntően tapasztalati alapú – tartóssági tervezési módszerek továbbfejlesztésének, kibővítésének tekinthető. A módszer célja, hogy a betonszerkezeteket érő környezeti hatásokat, illetve a betonszerkezetek e környezeti hatással szembeni ellenállását a befolyásoló tényezőket tartalmazó számszerű összefüggésekkel írjuk le, hasonlóan az erőtani követelményekhez. Ilyen modellek olyan környezeti folyamatokról készültek, melyek a betonszerkezetek tönkremenetelében a legnagyobb szerepet játsszák. Ilyen például a karbonátosodás, vagy kloridok által okozott korrózió, illetve a fagyás/olvadás, esetleg jégolvasztó anyagok következtében bekövetkező károsodás. A vizsgált hatások befolyásoló paramétereit valószínűségi változóként kezelve, azokhoz – célzott kísérletek vagy megfigyelések alapján rendelkezésre álló adatok birtokában – egy-egy eloszlástípust rendelve, majd a szükséges megbízhatósági szintet kitűzve, a használati élettartamhoz tartozó határállapothoz tartozó követelmény számszerűsített formában – valószínűségelméleti alapon – közvetlenül felírható. E folyamat lépései a következők:

I. A tönkremeneteli folyamatot leíró modell megválasztása

A tervezési folyamat első lépéseként egy olyan valós modellt kell találnunk, amely megfelelő pontossággal írja le a szerkezet tönkremeneteli folyamatát (tönkremenetelen itt a tartósságnak azt a szintjét értjük, melyen túl a szerkezet tervezett funkciója – teherbírasi vagy használhatósági okokból – korlátozottá válik). Ez az adott tönkremeneteli módtól, és az azt okozó hatástól függően fizikai vagy kémiai leírás is lehet. E modell paramétereinek statisztikai leírásáról megfelelő laboratóriumi kísérletekkel, vagy tényleges folyamatok megfigyeléséből származó adatokkal gondoskodhatunk. Így származtathatjuk az anyag ellenállását befolyásoló paraméterek főbb jellemzőit (várható értéket, szórást). Ugyanilyen módon a környezeti hatásokra vonatkozó modellek befolyásoló paramétereinek statisztikai adatai is beszerezhetők.

II. A tartóssági határállapot definiálása

Ezen lépésben azt kell eldöntenünk, hogy a tartósság mely szintjének túllépése esetén válik korlátozottá a szerkezet funkciója (teherbírása vagy használhatósága) a tervezett használati élettartam alatt. Ez a határállapot építményenként változó a rendeltetéstől, anyagtulajdonságoktól és elhelyezkedéstől függően. Például lehet:

- ◆ az acélbetétek depassziválódása karbonátosodás következtében
- ◆ repedések megjelenése a betonacél korróziója miatt
- ◆ a betonfedés lepattogzása a betonacélok korróziója miatt
- ◆ a szerkezet összeomlása a betonacél korróziójából adódó keresztmetszet-csökkenés miatt

Tervezési célokra általában a fenti határállapotok közül a legrövidebb használati élettartamot eredményező határállapot a fontos, vagyis a szóban forgó tervezési határállapot definiálható akár úgy is, hogy azt tekintjük határállapotnak, amikor a fenti folyamatok közül az első eléri a szerkezet funkcióját korlátozó kritikus szintet.

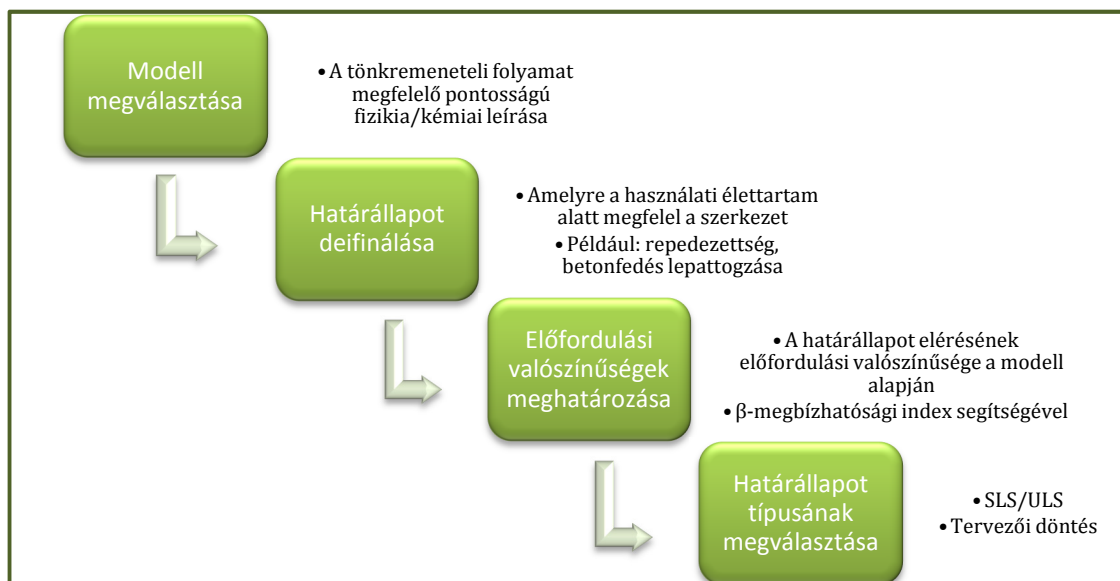
III. A tartóssági határállapot bekövetkezési valószínűségének kiszámítása

Ebben a lépésben a szerkezet megbízhatósági szintjét kell meghatározni, amelyet célszerű a megbízhatósági alapú tervezésben használatos β -megbízhatósági indexszel kifejezni. Az erőtani tervezésben alkalmazott határállapotokhoz a tönkremenetel következményei alapján rendelt β értékeket az EC0 tartalmazza.

IV. A tartóssági határállapot típusának definiálása

Ebben a lépésben a tervező feladata a tartóssági határállapot típusának megválasztása, mely lehet teherbírási (ULS) vagy használhatósági (SLS) attól függően, hogy a tartóssági határállapot túllépése a szerkezetre nézve teherbírásvesztéssel vagy csak korlátozott használhatósággal jár. Például a szerkezet repedezettsége a legtöbb esetben nem tekinthető teherbírási határállapotnak, mivel a repedések nem vezetnek hirtelen tönkremenetelhez, így a megbízhatósági index értékét 1.0 és 1.5 közé célszerű felvenni. Ám előfordulhatnak olyan esetek is, amikor nagyobb megbízhatóságot követelünk meg a szerkezettől: a beruházó külön igényei alapján – például esztétikailag fontos a repedésmentes szerkezet –, vagy például ridegtöréshez vezető repedések esetén a szerkezet repedezettsége akár gyors tönkremenetelhez is vezethet. Ilyen esetekben a tervező felelőssége a határállapot típusának (ULS vagy SLS) megválasztása.

Az alábbi ábra a használati élettartam alapú tervezés folyamatát szemlélteti [1].



1. ábra: A használati élettartam alapú tervezés lépései

3. A használati élettartam alapú tervezés különböző szintjei

A határállapot koncepción alapuló tervezés lényege egy, a határállapotot számszerűen kifejező egyenlet (erőtani tervezés esetén ezt erőtani követelménynek nevezzük) teljesítése. Ez tartalmazza a hatásokat és ellenállásokat, valamint az ezeket befolyásoló tényezőket.

A határállapot általános formulája:

$$g(e, r) = 0$$

ahol

$g(e, r)$:	a határállapot függvény
e :	terhek, hatások
r :	ellenállás

A szerkezetek tervezésének alapja ezen határállapot ellenőrzése, amely többféle megközelítéssel történhet:

- ◆ valószínűségelméleti módszerrel,
- ◆ fél-valószínűségi módszerrel (pl. parciális tényezők módszerével),
- ◆ tapasztalati szabályokon alapuló módszerrel,
- ◆ megelőző módszerrel

A következőkben röviden bemutatom a fent felsorolt tervezési eljárásokat.

I. Teljes valószínűségi eljárás

Alapegyenlete:

$$P\{g(e, r)\} \leq 0$$

Ez az eljárás a szerkezet megbízhatóságát valószínűségi alapon értékeli. Ez történhet a tönkremenetel valószínűségének, vagyis a kockázatnak (p) a becslésével, vagy a β megbízhatósági indexszel. A módszer lényege, hogy a számítás során a tönkremenetel kockázatát (vagy az abból számított β értéket) közvetlenül annak vállalható (optimális) értékével (p_{opt} vagy β_{opt}) hasonlítják össze, melyet kifejező összefüggésből a szerkezet szükséges teherbírása közvetlenül meghatározható. Az ilyen módszerek gyakorlati alkalmazhatósága – elsősorban a bonyolult matematikai számítások miatt – rendkívül korlátozott.

II. Parciális tényezők módszere

Fél-valószínűségi tervezési eljárás, amely a határállapot egyenletében szereplő hatások és ellenállások befolyásoló tényezőinek valószínűségi értelemben vett bizonytalanságait parciális biztonsági tényezőkkel veszi figyelembe. Ennek megfelelően a hatások egy növelő értelmű parciális tényezővel ($\gamma_F > 1$) szorozódnak, míg az ellenállások az ezt befolyásoló paraméterek bizonytalansága miatt egy csökkentő értelmű parciális tényezővel ($\gamma_M < 1$) lesznek elosztva. Az ilyen módszerek egyszerűbbé, és gyorsabbá teszik a tervezési folyamatot, ezért a gyakorlatban széleskörűen elterjedtek (az Eurocode is ezt alkalmazza).

III. Tapasztalati szabályokon alapuló módszer

A tervezés során alkalmazott szabályok tapasztalati úton alakultak ki. A legtöbb ilyen eljárás szerkesztési szabályokat, értékhatárokat tartalmaz korábban megépült szerkezetek, esetleg azok tönkremenetelének tapasztalatai alapján. A használati élettartam alapú tervezés e módszernek megfelelő változatai már nem tapasztalati képleteken, hanem valós fizikai/kémiai modelleken alapulnak.

IV. Megelőző tervezési módszer

A fenti tervezési eljárásoktól alapjaiban különbözik az ún. megelőző módszer, mely a határállapot elérésének a megelőzésére, a tönkremenetelnek az elkerülésére fókuszál. A használati élettartam alapú tervezésben való alkalmazáskor a célja a szerkezet környezeti hatások okozta tönkremenetelének elkerülése, megelőzése. Ehhez olyan anyagválasztást, szerkezeti kialakítást javasol, amely vagy teljesen kizárja a szóban forgó környezeti hatásokat, vagy azok egy adott intenzitásnál nagyobb értékeinek az előfordulását teszi lehetetlenné.

4. A betonszerkezetek megbízhatóságának kezelése a használati élettartam során

Az EN 1990 szerint a betonszerkezetek megbízhatóságát többféle módon lehet kezelni. Lehetőség van a szerkezetek osztályokba sorolására – a tönkremenetel miatti kár következmény mértéke alapján –, vagy a már korábban említett β megbízhatósági index szerint [2].

Kárhányad szerinti osztály	Leírás	Példák az épületek és építőmérnöki szerkezetek köréből
CC3	Az emberélet elvesztésének jelentősége nagy, vagy a gazdasági, társadalmi, környezeti következmények rendkívül jelentősek	Lelátók, közösségi épületek, ahol a tönkremenetellel járó kár nagy Például: koncertterem
CC2	Az emberélet elvesztésének jelentősége közepes, a gazdasági, társadalmi, környezeti következmények számottevőek	Lakó- és irodaházak, közösségi épületek, ahol a tönkremenetellel járó kár közepes Például: irodaház
CC1	Az emberélet elvesztésének jelentősége kicsi, a gazdasági, társadalmi, környezeti következmények nem jelentősek, vagy elhanyagolhatók	Mezőgazdasági épületek, melyekben szokásos esetben emberek nem tartózkodnak, növényházak Például: raktárak

2. táblázat: Szerkezetek kárhányad szerinti osztályozása

A differenciálás alapja az esetleges meghibásodások, üzemzavarok következményeinek mértéke, és hatása az emberek életére (consequences class) (2. táblázat). Általában a teljes szerkezet egy osztályba sorolható, ám lehetnek olyan szerkezeti kialakítások, vagy

tervezői megfontolások, amelyek miatt egyes elemeket a többitől eltérő osztályba sorolunk.

A kárhányad szerinti besoroláshoz (2. táblázat) hozzárendelhetők az RC – megbízhatósági osztályok (reliability class) (3. táblázat). Ezek az adott referencia időszak függvényében, illetve a CC – osztályok alapján ajánlott β értékeket adnak meg.

Megbízhatósági osztály	A β minimális értékei	
	1 éves referencia-időszak	50 éves referencia-időszak
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

3. táblázat: A β ajánlott értékei az EC 0 szerint

A 4. táblázatban a megbízhatósági osztályokhoz tartozó ajánlott legkisebb β értékek találhatóak a vizsgált határállapot függvényében. Tartósságra való tervezéskor például használhatósági határállapotnak tekinthető az acélbetétek depassziválódása, míg az ennek következtében elkorrodáló acélbetétek keresztmetszet-csökkenése miatti tartószerkezet-összeomlás teherbírési határállapotként kezelendő.

Határállapot	Előírányzott β megbízhatósági index	
	1 év	50 év
Teherbírési	4,7	3,8
Fáradási		1,5-3,8
Használhatósági (irreverzibilis)	2,9	1,5

4. táblázat: A β ajánlott értékei a különböző határállapotok esetén az EN 0 szerint

Megjegyezhető, hogy ha egy ULS szinten a betonacélok korróziója nem zárható ki, viszont az esetleges javítás/felülvizsgálat/karbantartás nem végezhető el, akkor a szerkezetben extra megerősítést kell alkalmazni, hogy elkerüljük a tönkremenetelt. Ennek a többlet megerősítésnek a mértéke jelentősen függ a betonacélok depassziválódására vonatkozó megbízhatóságtól. Így megállapítható, hogy minél magasabb a depassziválódás elkerülésének megbízhatósági szintje, annál kevesebb többlet megerősítésre van szükség.

A betonszerkezetek használati élettartama nagymértékben függ a környezeti hatásoktól, melyek leggyakrabban a betonacélok korrózióját idézik elő. Ez a korrózió, illetve a korrózióval kapcsolatban álló szerkezeti részek mérete befolyásolja a szerkezet használhatóságát. Maga a korrózió rengeteg körülménytől függ, így konkrét határértékek a megbízhatóság megállapításához nem állnak rendelkezésre. A táblázatos formában rendelkezésre álló adatok csak közelítő értékek, melyek felülvizsgálatra, és a speciális körülmények figyelembe vételére szorulhatnak.

Az előírányzott megbízhatósági szint teljesülését különböző ellenőrzésekkel segíthetjük elő. Ezek vonatkozhatnak mind a tervezésre, kivitelezésre, mind pedig a karbantartásra. Ilyen lehet a tervellenőrzési szintek (DSL – design supervision level) meghatározása, melyek előírhatnak szokásos vagy bővített ellenőrzést; ebből kifolyólag pedig a tervezők és ellenőreik megfelelő szakértelmét. A tervezők mellett a kivitelezést is differenciálhatjuk: a kivitelezési ellenőrzési szintek (EXC – execution level) megadásával, melyre ugyanazon tulajdonságok vonatkoznak, mint a tervezés esetén. Végül pedig a

szerkezet használati élettartama alatti karbantartásokat, ellenőrzéseket is előírhatjuk: állapotellenőrzési osztályokkal (CCL – condition control level).

5. A használati élettartam alapú tervezés tartóssági kérdéseinek előzménye

A jelen dolgozatban bemutatásra kerülő tartósságra vonatkozó tervezési módszer előzménye egy 1996-ban indult kutatási projekt: a DuraCrete Program [3]. A Brite-EuRam¹ program keretein belül indult kutatást 1996 és 1999 között 6 lépcsőben publikáltak, majd 2000-ben egy 7. összefoglaló kötet jelent meg. A DuraCrete célja egy általános útmutató létrehozása újonnan épülő szerkezetek tartóssági tervezéséhez és meglévő szerkezetek tartóssági újratervezéséhez. A kiadott 7 kötetben a betonszerkezetek tartóssági tervezésének valószínűségelméleti módszerét fejleszti ki, és mutatja be. A megjelent kötetek és a fejlődési lépcsők a következők:

- I. A tartósságra való tervezéssel kapcsolatban felmerülő rengeteg kérdést, vitát tartalmazza, amely a tervezési módszer elméleti vázát adta. Emellett egy mini-kísérlet is szerepel benne, amely egy betonszerkezet kloridok által okozott korrózióját szemlélteti.
- II. Az I. részben elvégzett kísérlet, illetve az elméleti vezérfonal megalkotása után ebben a részben a tönkremeneteli folyamat modellezése szerepel. A cél egy olyan letisztult modell megalkotása volt, amely a mérnöki tervezés során egyszerűen alkalmazható.
- III. A korábbi tesztek alapján kiválasztott kulcs-paraméterek felhasználásával ebben a kötetben a megfelelőségi feltételt határozza meg a program. Emellett számtalan teszteredmény szerepel még különböző összetételű betonkeverékek ellenállásértékeivel: karbonátosodással, kloridokkal, fagyással és fáradással kapcsolatban.
- IV. Az ismert paraméterek bizonytalanságainak tönkremeneteli modellben való figyelembe vételére, illetve ezen paraméterek statisztikai úton történő számszerűsítésére tesz javaslatot ebben a kötetben. Itt eredményül egy táblázatot közöl, amelyben a paraméterekhez tartozó eloszlásokat, várható értékeket és szórásokat adja meg. Emellett a környezeti változókat számszerűsíti és osztályokba sorolja, illetve a betonszerkezetek mechanikai viselkedését számszerűsíti.
- V. Több lényeges szerkezeti elemtípust tervez meg, melyek a VI. kötetben lesznek értékelve.
- VI. Az előző kötet elemeire vonatkozóan a határállapot függvényeket határozza meg. Emellett a bemenő paraméterek érzékenységi vizsgálatait, illetve a mai tervezési gyakorlat szerint határozza meg a szerkezet megbízhatóságának célértékét.

¹ Brite: Basic Research in Industrial Technologies in Europe
EuRam: European Research in Advanced Materials

VII. A zárókötet foglalja össze az elvégzett kísérletek eredményeit, illetve leírja a valószínűségelméleti alapon végzett tartósságra való tervezés menetét.

A következőkben ennek a teljes valószínűségi módszernek a továbbfejlesztését, valamint ennek alapján – az acélbetétek karbonátosodás miatti depassziválódására vonatkozóan - a parciális tényezős módszert mutatom be.

6. Betonszerkezetek tartósságra való tervezésének módszere²

6.1. Karbonátosodás által okozott korrózió vizsgálata repedésmentes beton esetén

6.1.1. Teljes valószínűségi eljárás

A tervezési folyamat első lépése a vizsgált határállapot kijelölése. Ez a karbonátosodás által okozott korrózió esetében az **acélbetétek depassziválódása** lesz.

Alapegyenlet:

$$p\{\} = p_{dep} = p\{a - x_c(t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (6.1)$$

ahol:

$p\{\}$:	a depassziválódás bekövetkezési valószínűsége
a :	betonfedés [mm]
$x_c(t_{SL})$:	a karbonátosodás behatolási mélysége a t_{SL} időpillanatban [mm]
t_{SL} :	tervezett használati élettartam [év]
p_0 :	meghatározott hibahatár

A képletben szereplő a és $x_c(t_{SL})$ változók teljes valószínűségi módszerrel határozhatók meg.

Szövegesen megfogalmazva a feltételt: annak valószínűsége, hogy a karbonátosodás behatolási mélysége a tervezett használati élettartam végén túllépi a betonfedés értékét, kisebb kell, hogy legyen egy megengedett p_0 valószínűségi értéknél. A p_0 egy előre meghatározott célérték. A határállapot függvény ezek alapján a következő:



2. ábra: Karbonátosodás következtében korrodálódott vasbeton

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) \quad (6.2)$$

A (6.2) egyenletet kibővíthetjük a két oldalt befolyásoló paraméterekkel, így a következő egyenlethez jutunk:

$$g(a, x_c(t)) = a - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (6.3)$$

ahol:

a :	a betonfedés értéke [mm]
-------	--------------------------

² Az ebben a fejezetben szereplő képletek, összefüggések a [1] alapján kerülnek bemutatásra

$x_c(t)$:	a karbonátosodás behatolási mélysége a t időpillanatban [mm]
t :	időtartam [év]
k_e :	környezeti függvény [-]
k_c :	a kivitelezési folyamatot jellemző tényező [-]
k_t :	regressziós paraméter [-]
$R_{ACC,0^{-1}}$:	a beton effektív karbonátosodási ellenállásának inverze [(mm ² /év)/(kg/m ³)]
ε_t :	hiba tényező [-]
C_s :	CO ₂ -koncentráció [kg/m ³]
$W(t)$:	éghajlati tényező [-]

A fenti egyenlet a betonban uralkodó transzport folyamat: a diffúzió jelenségén alapul. Fick 1. törvénye alapján: a diffúzió anyagáram a koncentráció térbeli változásának a meredekségével arányos. A D diffúziós együttható értéke mindig pozitív, mértékegysége pedig [m²/s]. [5] [6]

Az egyenletben szereplő paraméterek meghatározása, számszerűsítése teszi a módszert fontossá a tartóssági problémák kezelésének szempontjából. Emiatt a következőkben az egyes jellemzők meghatározásának módját, függvényeit és befolyásoló tényezőit mutatom be.

A betonfedés (a)

A betonfedés értéke mindig a tervezés során dől el, igazodva az aktuális tervezési gyakorlathoz. Így nem tekinthető konstans értéknek, sokkal inkább egy sztochasztikus változónak, melyet különböző eloszlástípusokkal írhatunk le. Amennyiben választottunk egy eloszlásfüggvényt, figyelembe kell vennünk annak minden tulajdonságát a kapott eredmények értékelésénél. Például tudnunk kell, ha béta-, lognormális-, Weibull-, vagy Neville-eloszlást alkalmazunk, hogy a függvény negatív értékei eleve ki vannak zárva. Viszont normál-eloszlás esetén számíthatunk negatív értékekre is, amely egy betonfedés esetén nem értelmezhető. Ez az átlagérték nagyságától függ: minél nagyobb az átlagérték, annál kisebb a valószínűsége a negatív betonfedésnek statisztikai szempontból. Így negatív érték a rossz kivitelezés következtében – például ha megnyomódik a beton a zsaluzatban – csak elméletben adódhat. Ugyanígy fenntartásokkal kell kezelnünk a magasabb értékeket is, melyek szintén az eloszlásfüggvény tulajdonságaiból következnek.

A betonfedés konkrét meghatározásánál első lépésben figyelembe vehetjük az összes eloszlástípust, ám a későbbiekben azokat célszerű választani, melyeknél a negatív értékek ki vannak zárva – különösen, ha alacsonyabb betonfedést kell leírunk. A Neville-eloszlás általában alkalmazható, különösen akkor, ha a megengedett méreteltérések az állapotellenőrzések során kicsik. Ezek alapján a betonfedés átlagértéke: $m = \text{nom } a$ [mm]; a szórás pedig: $s = 8-10$ mm speciális eszközök nélkül; $s = 6$ mm speciális eszközökkel. Korlátozott eloszlások esetén az alsó korlát: 0mm; a felső korlát: $5 \cdot \text{nom } a < d$, ahol d: a szerkezeti elem szélessége [mm]

Több helyszíni vizsgálat során kiderült, hogy a megfigyelt szórás 2-15 mm között volt, így a legtöbb esetben a fenti ajánlás betartható.

Tervezett használati élettartam (t_{SL})

Az építmények tervezett élettartamára vonatkozóan az EC0 szabvány kategóriánként különböző értékeket ad meg, melyet az 1. táblázatban korábban bemutatam.

Környezeti függvény (k_e)

A környezeti függvény a relatív páratartalom diffúziós együtthatóra – s ezzel együtt a beton karbonátosodási ellenállására – gyakorolt hatását veszi figyelembe. A referencia hőmérséklet/páratartalom: T=20°C / 65%.

A környezeti függvény meghatározása:

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (6.4)$$

Ahol:

RH_{real} :	a karbonátosodott réteg relatív nedvességtartalma [%]
RH_{ref} :	a relatív nedvességtartalom referencia értéke [%]
f_e :	kitevő [-]
g_e :	kitevő [-]

Az elvégzett kísérletek eredményei azt mutatták, hogy kb. 60% relatív nedvességtartalomig nő a karbonátosodás behatolási mélysége, majd 60% fölött csökkenő tendenciát mutat a nedvességtartalom növekedésével. Ebből következően az Európára kevésbé jellemző 60% alatti relatív nedvességtartalom értékek miatt a fenti kifejezés megfelelően leírja a környezeti függvényt; alacsonyabb relatív nedvességtartalom értékek esetén pedig a biztonság javára közelít.

A fenti képletben szereplő változók meghatározása:

A karbonátosodott réteg relatív páratartalma (RH_{real})

Adott szerkezet esetén a legközelebbi meteorológiai állomás adatait – napi átlag értékek - használhatjuk fel a relatív páratartalom számítására. Tekintve, hogy a relatív páratartalom értékek 0 és 100% között mozoghatnak, olyan eloszlást kell alkalmazni a leírására, amely szigorúbb korlátokkal rendelkezik. A földrajzi elhelyezkedéstől függően előfordulhat olyan eset, hogy a relatív páratartalom értékek jelentősen eltérnek nullától. Ilyen esetekben célszerű alacsonyabb és magasabb korlattal rendelkező eloszlástípust választani, például: béta-eloszlást vagy Weibull(max)-eloszlást.

Szigorúan véve a karbonátosodott betonréteg relatív páratartalmát kéne számításba vennünk, ám ezekhez az adatokhoz bonyolult lenne hozzájutni. Ezért elegendőnek tűnik a karbonátosodott réteget körülvevő levegő adatainak felhasználása. Ezek lehetnek napi átlagértékek, ám az elvégzett kísérletek [3] azt mutatták, hogy az évi átlagértékek

alkalmazása is megfelelő. Abban az esetben, ha rendelkezésre állnak statisztikai adatok a napi értékekről, ajánlott azokat felhasználni.

A relatív páratartalom referencia értéke (RH_{ref})

A relatív páratartalom referencia értékének meghatározásakor ügyelni kell arra, hogy összhangban legyen a beton karbonátosodással szembeni ellenállásának meghatározásakor alkalmazott értékkel. Az ajánlott ACC-eljárás (gyorsított karbonátosodási teszt) szerint a referencia értékek: $T=20^{\circ}\text{C}/65\%\text{RH}$. Így a relatív páratartalom referencia értéke: 65% (konstans)

Alkalmazott kitevők (g_e, f_e)

Az alkalmazott kitevők az aktuális kísérleti eredmények görbére való illesztése során határozhatók meg. A legkedvezőbb eredmények a következő értékekkel adódtak:

$$g_e=2,5 \text{ [-]}$$

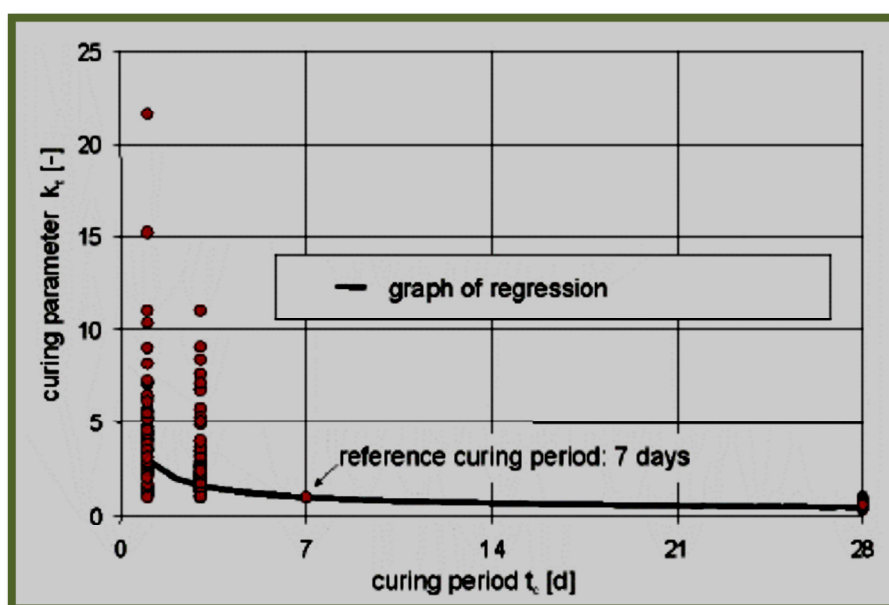
$$f_e=5,0 \text{ [-]}$$

Ezek függenek a kitettségi tulajdonságoktól és kezelési szakaszoktól.

A kivitelezési folyamatot jellemző tényező (k_c)

A kivitelezési folyamatot jellemző tényező az utókezelés hatását veszi figyelembe a beton effektív karbonátosodási ellenállására vonatkozóan. Ezzel kapcsolatban minden olyan intézkedés, amelynek célja a betonfelület idő előtti kiszáradásának megelőzése, figyelembe van véve ebben a paraméterben. Ilyen intézkedések lehetnek például: vízzel vagy levegővel való kezelés, amely a kiszáradástól óvja meg a felületet.

Az alábbi grafikonon (3. ábra) az utókezelés időtartamának és a kezelés hatásának összefüggése látható.



3. ábra: Az utókezelés hatása

A kivitelezési/utókezelési folyamatot jellemző paraméter kétszeresen logaritmikusan, lineárisan csökkenő függvény segítségével határozható meg. A Bayes-féle esést alkalmazva a k_c tényező meghatározására a következő összefüggés adódik:

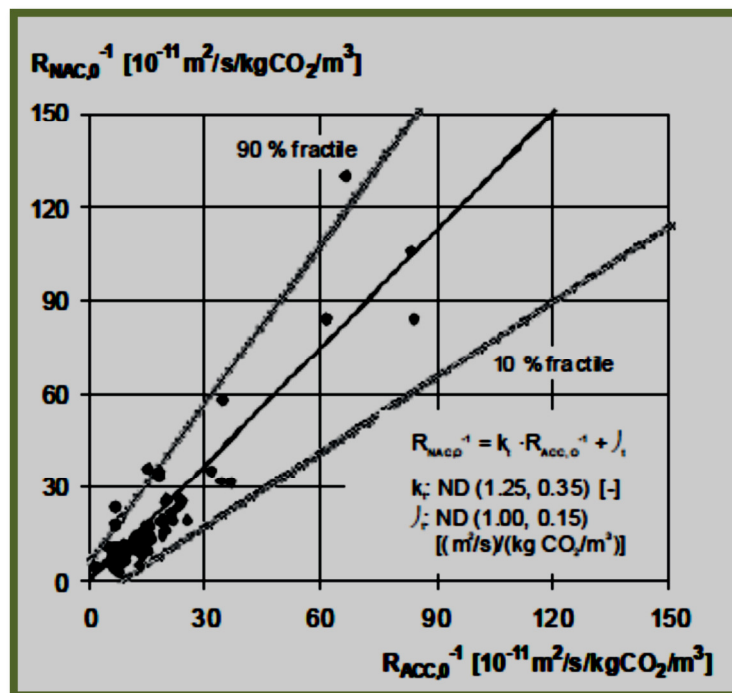
$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c} \quad (6.5)$$

Ahol:

- t_c : a kezelési periódus ideje, konstans érték [nap]
 b_c : regressziós kitevő; normál eloszlás szerint: $m=-0,567$, $s=0,024$ [-]

A beton effektív karbonátosodási ellenállása ($R_{ACC,0}$)

Az ellenállás értékének meghatározása az ACC-teszt (lásd 4. ábra) segítségével történik, amely egy gyorsított karbonátosodási teszt. Lényege, hogy laboratóriumi körülmények között előre elkészített és tárolt beton próbatesteket a következőkben meghatározott feltételek szerint tesztelnek a t_0 referencia időtartam alatt. A természetes körülmények között lejárló karbonátosodás (NAC) és a laboratóriumi körülmények között lejárló karbonátosodás (ACC) közötti összefüggés a 4. ábrán látható.



4. ábra: A természetes és laboratóriumi körülmények között lejárló karbonátosodás közötti összefüggés

A természetes karbonátosodás esetén az értékek általában nagyobbak lettek, mint a laborban kapott átlagos $A=1,25$ érték. Ez azzal magyarázható, hogy a gyorsított kísérletben a száraz oldalon a karbonátosodás behatolása nem olyan mély, mint természetes körülmények között. Ez enyhén késlelteti a karbonátosodási folyamatot a laborban. Nagyon száraz beton esetén ez az érték – elméletileg - $R_{ACC,0}^{-1}=0$ -t jelent. Az

olyan beton esetén, amelynek nincs végtelen ellenállása – az úgynevezett hibahatár $\varepsilon_t > 0$ kerül bevezetésre.

Teljesítmény vizsgálat az ellenállás inverzének meghatározására

Az ellenállás inverzének meghatározására többféle direkt és indirekt eljárást alkalmaztak. Ezek közül az ACC-teszt bizonyult legmegfelelőbbnek a következő előnyei miatt:

- ◆ a beton utószilárdulása miatti kedvező hatást nem kell figyelembe venni
- ◆ a karbonátosodási ellenállás karbonátosodás következtében való megváltozását nem kell figyelembe venni
- ◆ a kísérleti eredmények jól reprodukálhatók
- ◆ rövid idő alatt elvégezhető

Az ACC-teszt lépései a következők:

- I. 100x100x500 mm-es beton próbatestek gyártása
- II. A zsaluzat eltávolítása után a próbatesteket 7 napig 20°C-os vízben kell tárolni.
- III. A 7 nap eltelte után laboratóriumi körülmények között (20°C, 65%) további 21 napig kell tárolni a próbatesteket.
- IV. Ezután 28 napos korukban egy karbonátos kamrába kell helyezni a próbatesteket újabb 28 napra. Itt laboratóriumi körülmények, és $C_s=2,0\%$ CO₂-koncentráció uralkodik.
- V. Az eltelt 28 nap után a próbatesteket – melyek már 56 naposak – kivesszük a kamrából és széthasítják őket. A CO₂ behatolási mélysége lemérhető egy indikátor oldat segítségével a törési felületen.
- VI. A (6.6) képletbe való behelyettesítéssel meghatározható a keresett inverz ellenállás értéke.

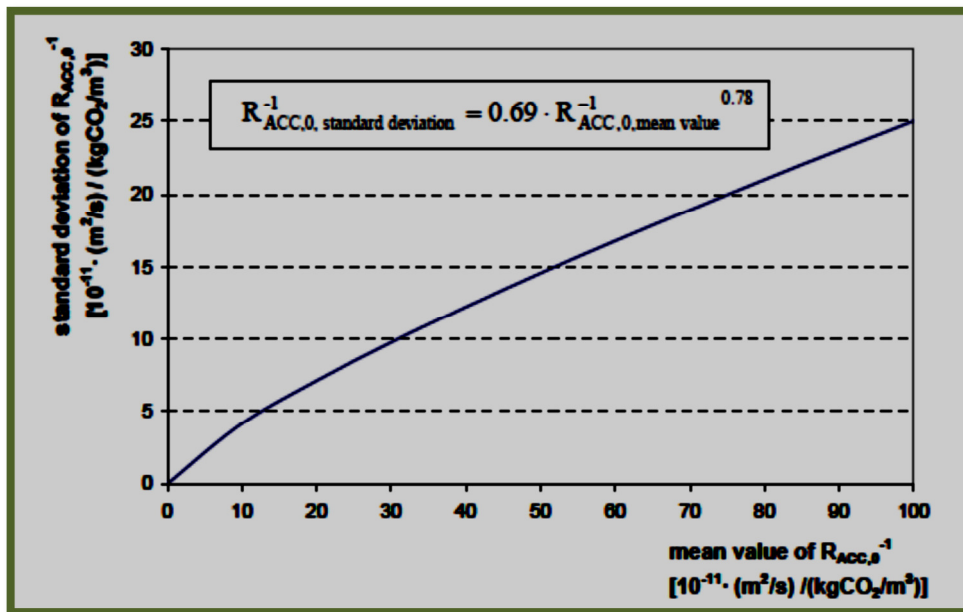
$$R_{ACC,0}^{-1} = (x_c/\tau)^2 \quad (6.6)$$

Ahol:

- τ : idő-állandó, a vizsgálat körülményeinek leírására szolgál, $\tau=420$ [-]
 x_c : a karbonátosodás mért behatolási mélysége [mm]

A karbonátosodási ellenállás inverzének értéke ($R_{ACC,0}^{-1}$)

Az ellenállás inverz értékei normál eloszlást mutatnak, melynek várható értéke a fenti (6.6) egyenlet adataival számítható. A várhatóértékek és a szórás közötti kapcsolat az 5. ábrán látható.



5. ábra: Az inverz karbonátosodási ellenállás várható értéke és szórás közötti összefüggés

Amennyiben nem állnak rendelkezésre kísérleti adatok, az alábbiakban megadott, szakirodalomban szereplő értékeket lehet alkalmazni, ahol az $R_{ACC,0}^{-1}$ értékei $10^{-11} [(m^2/s)/(kg/m^3)]$ - ben értendők. (5. táblázat)

Cement típus	w/C _{eqv}					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42.5 R	-	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
CEM I 42.5 R+FA (k=0,5)	-	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
CEM I 42.5 R+SF (k=2,0)	3,5	5,5	-	-	16,5	-
CEM III/B 42.5	-	8,3	16,9	26,6	44,3	80,0

5. táblázat: Az inverz karbonátosodási ellenállás szakirodalmi adatai

A mértékegységekre jelentős figyelmet kell fordítani, mivel az 5. táblázatban szereplő $R_{ACC,0}^{-1} [(m^2/s)/(kg/m^3)]$ mértékegységét a tönkremeneteli modell szerinti mértékegységre $[(mm^2/év)/(kg/m^3)]$ át kell váltani.

A vizsgálati módszer tényezői

A k_t és ε_t tényezők segítségével tudjuk a gyorsított karbonátosodási eljárás során meghatározott ellenállás értékét a természetes folyamat során kialakuló ellenállás értékére átkonvertálni. Így ez a két tényező a természetes és gyorsított eljárás közötti összes eltérést feloldja. A tömörítés, a vibrálás miatti vízmozgások, illetve az ezekből adódó különbségek a próbatest és szerkezet között nem számszerűsíthetők kellő pontossággal, így a kétféle eljárás között az alábbi módon teremtünk kapcsolatot (6.7):

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \quad (6.7)$$

Ahol:

- $R_{NAC,0^{-1}}$: a száraz beton effektív karbonátosodási ellenállás - értékének inverze, egy adott t_0 időpillanatra, a normál karbonátosodási teszt segítségével meghatározva
- $R_{ACC,0^{-1}}$: a száraz beton effektív karbonátosodási ellenállás - értékének inverze, egy adott t_0 időpillanatra, a gyorsított karbonátosodási teszt segítségével meghatározva
- k_t : csökkentő tényező, amely a gyorsított karbonátosodási eljárás hatását veszi figyelembe; normál eloszlással jellemezhető [-]
- ϵ_t : hiba - tényező, amely a gyorsított karbonátosodási eljárás esetleges pontatlanságait veszi figyelembe; normál eloszlással jellemezhető [(mm²/év)/(kg/m³)]

Környezeti hatás – CO₂-koncentráció (C_S)

A környező levegő CO₂-koncentrációja közvetlen hatással van a betonszerkezetekre. A hatás a következő kifejezéssel írható le:

$$C_S = C_{S,atm.} + C_{S,emi.} \quad (6.8)$$

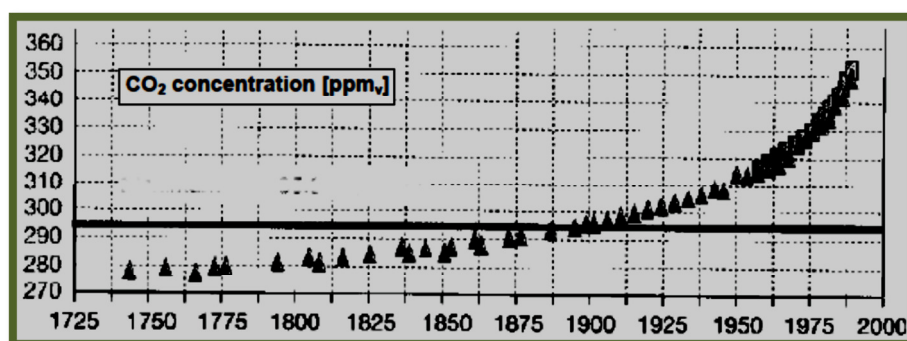
Ahol:

- C_S : a CO₂-koncentráció [kg/m³]
- $C_{S,atm.}$: az atmoszféra CO₂-koncentrációja [kg/m³]
- $C_{S,emi.}$: további CO₂-koncentráció különböző kibocsátó forrásokból [kg/m³]

A CO₂-koncentráció növekedése az alagutak és a belső égésű motorok alkalmazásával magyarázható. Szokványos szerkezetek esetén ettől a többlet CO₂-kibocsátástól eltekintünk, így a (6.8) képletben figyelmen kívül hagyható a $C_{S,emi.}$ érték.

Az atmoszféra CO₂-koncentrációja ($C_{S,atm.}$)

Az aktuális CO₂-koncentráció egy 350-380 milliommol nagyságrendű skálán adható meg. Ez megfelel 0,00057-0,00062 kg/m³ koncentrációnak. A megengedett eltérés maximális értéke: 10 milliommol. A CO₂-koncentráció átlagait extrapolálva az atmoszférában a 6. ábra szerinti értékek adódnak.



6. ábra: Az atmoszféra szén-dioxid-koncentrációja

A függvény szerint évente 1,5 milliomoddal nő az atmoszféra koncentrációja. Erre a trendre alapozva a CO₂-koncentráció egyszerűsítve normál eloszlású: 0,00082 átlagértékű, és 0,0001 szórású.

Éghajlati tényező ($W(t)$)

A betonfelületet „nedvesítő események” miatt a mérsékelt éghajlat tulajdonságait veszi figyelembe az éghajlati függvény.

$$W = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w \quad (6.9)$$

Ahol:

t_0 : referencia időszak [év]
 w : éghajlat kitevő [-]
 ToW : a nedves időszak [-], meghatározása a (6.10) képlet alapján

$$ToW = \frac{\text{esős napok száma, a csapadék mennyisége } (h_{Nd}) > 2,5 \text{ mm évente}}{365} \quad (6.10)$$

p_{SR} : a csapóeső bekövetkezésének valószínűsége [-]
 b_w : csökkentő kitevő [-]

Az esőket leíró paraméterek

A karbonátosodási ellenállás szempontjából az eső hatása a betonra függ a szerkezet elhelyezkedésétől és a geometriai jellemzőktől. Eszerint a következő változókat kell definiálni: ToW , p_{SR}

A ToW az esős napok számának átlagértéke egy évre vonatkoztatva. (6.10) Esős napnak azt a napot nevezzük, amely során a minimális 2,5mm-es értéknél nagyobb vagy egyenlő a csapadékvíz mennyisége. A csapadékmennyiség – így az esős napok számának – meghatározásához a legközelebbi meteorológiai állomás adatai használhatók. Az előbbi magyarázat alapján a ToW egy konstans paraméter, amely a meteorológiai állomásról származik.

A p_{SR} a szélirány átlagos eloszlása eső alkalmával. Ennek meghatározása is a legközelebbi meteorológiai állomás adatainak segítségével történik. Számszerűsítése történhet:

- ◆ egy konstans értékkel: amennyiben függőleges felületű elemeket kezelünk, a meteorológiai állomás adatai alapján határozható meg
- ◆ értéke: 1, amennyiben vízszintes felületeket kezelünk
- ◆ értéke: 0, amennyiben belső szerkezeti elemet kezelünk

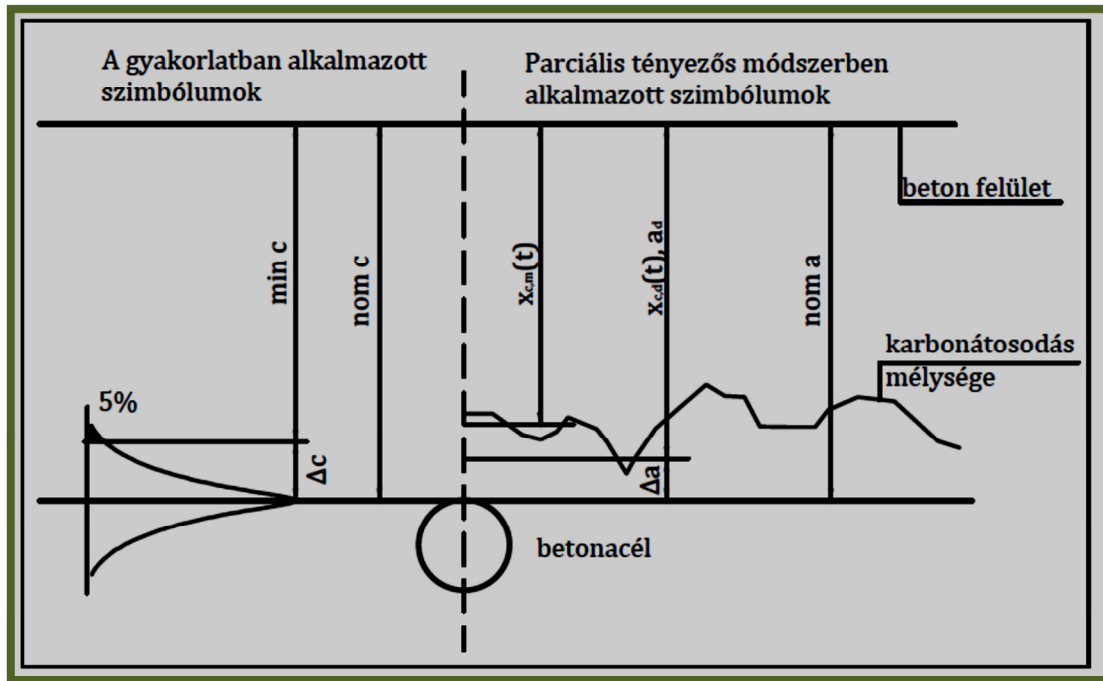
Modell - változók (b_w , t_0)

Az időjárás paraméterben szereplő két változó számszerűsítése:

b_w : normál eloszlás alapján, ahol várható érték (m)=0,446; szórás (s)=0,163
 t_0 : konstans érték; $t_0=0,0767$

6.1.2. Parciális tényezők módszere

A vizsgált határállapot ez esetben is az **acélbetétek depassziválódása** lesz. Az eljárás megértéséhez az alábbi ábra nyújt magyarázatot. (7. ábra)



7. ábra: A parciális tényezős módszer esetén alkalmazott jelölések

A parciális tényezős módszer alkalmazásának célja egy olyan tartósságra való tervezési eljárás létrehozása, amely a karbonátosodás által okozott korrózióra vonatkozóan egyszerű számításokkal teszi lehetővé a tervezést anélkül, hogy a bemenő paraméterek valószínűségi eloszlásait figyelembe kellene venni. Amennyiben az alábbi feltétel teljesül, az adott szerkezeti elem megfelel a tartóssági követelményeknek – a karbonátosodás által okozott korrózió tekintetében.

Alapegyenlet:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0 \quad (6.11)$$

Ahol:

- a_d : a betonfedés tervezési értéke [mm]
- $x_{c,d}(t_{SL})$: a karbonátosodás behatolási mélységének tervezési értéke a t_{SL} időpillanatban [mm]

Az egyenlet szerint az acélbetétek depassziválódása esetén feltétel, hogy a karbonátosodás behatolási mélységének tervezési értéke ne haladja meg a tervezett betonfedés értékét.

A képletben szereplő paraméterek számítása:

◆ a betonfedés tervezési értéke (a_d): $a_d = a_k - \Delta a$ (6.12)

Ahol:

a_k : a betonfedés karakterisztikus értéke [mm]

Δa : a betonfedés megengedett eltérése [mm]

◆ a karbonátosodás behatolási mélységének tervezési értéke a t_{SL} időpillanatban:
 $x_{c,d}(t_{SL}) = x_{c,c}(t_{SL}) \cdot \gamma_f$ (6.13)

Ahol:

$x_{c,c}(t_{SL})$: a karbonátosodás behatolási mélységének karakterisztikus értéke; a karbonátosodás behatolási mélységének várható értékével vehető figyelembe [mm]

γ_f : a karbonátosodáshoz tartozó parciális biztonsági tényező értéke [-]

A (6.11) egyenletben szereplő $x_{c,d}(t_{SL})$ meghatározására az alábbi egyenlet alkalmazható, amely a befolyásoló paramétereket tartalmazza.

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d}) \cdot C_{s,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})} \quad (6.14)$$

Ahol:

a_d : a betonfedés tervezési értéke [mm]

t_{SL} : tervezett használati élettartam [év]

$x_{c,d}(t_{SL})$: a karbonátosodás behatolási mélységének tervezési értéke a t_{SL} időpontban [mm]

$k_{e,d}$: a környezeti függvény tervezési értéke [-], meghatározása (6.15) szerint

$$k_{e,d} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real,k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (6.15)$$

Ahol:

$RH_{real,k}$: a karbonátosodott réteg relatív nedvességtartalmának karakterisztikus értéke [%]

RH_{ref} : a relatív nedvességtartalom referencia értéke [%]

f_e : kitevő, értéke: 5,0

g_e : kitevő, értéke: 2,5

γ_{RH} : a karbonátosodott réteg relatív nedvességtartalmához tartozó parciális biztonsági tényező, értéke: 1,3 (a módszer kidolgozottságának jelenlegi szintjén csak tájékoztató érték, a későbbiekben változhat; 50 éves tervezési élettartamhoz, és $\beta=1,3$ megbízhatósági indexhez tartozik)

$k_{c,d}$: a kivitelezési folyamatot jellemző tényező tervezési értéke, amelynek várható értéke az alábbi táblázatból határozható meg. (6. táblázat)

utókezelés ideje [nap]	1	2	3	4	5	6	7
$k_{c,d}$	3.00	2.03	1.61	1.37	1.20	1.09	1.00

6. táblázat: Az utókezelést jellemző tényező értékei

$k_{t,d}$: a regressziós paraméter tervezési értéke, melynek átlagértéke: 1,25

$R_{ACC,0,k^{-1}}$: a beton effektív karbonátosodási ellenállása inverzének karakterisztikus értéke [(mm²/év)/(kg/m³)]

γ_R : az inverz karbonátosodási ellenálláshoz tartozó parciális biztonsági tényező, melynek értéke: 1,5

$\varepsilon_{t,d}$: a hiba-tag tervezési értéke, melynek átlagértéke: 315,5

$C_{S,d}$: a CO₂-koncentráció tervezési értéke [kg/m³], átlagértéke: 0,00082

$W(t)$: időjárás függvény, melynek számítása:

$$W = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_{w,d}}}{2}} \quad (6.16)$$

Ahol:

t_0 : referencia időszak, értéke: 0,0767 év

ToW : a nedves időszak [év]

p_{SR} : a zuhogó eső bekövetkezési valószínűsége [-]

$b_{w,d}$: a regressziós kitevő tervezési értéke, átlagértéke: 0,446

A fent megadott parciális biztonsági tényezők (γ_R és γ_{RH}) és a Δa biztonsági határ értéke a használhatósági határállapothoz tartozó megbízhatósági index ($\beta=1,3$) alapján lett felvéve. Amennyiben magasabb megbízhatósági szint van előírva, a parciális biztonsági tényezőket aszerint kell módosítani.

A parciális tényezős módszer a biztonság javára való egyszerűsítéseket tartalmaz a teljes valószínűségi eljáráshoz képest. Ebből adódóan a teljes valószínűségi eljárás gazdaságosabb szerkezeti megoldásokat eredményezhet, viszont a részletes számításhoz szükséges bemenő paraméterek meghatározása többletköltségekkel járhat.

6.2. Kloridok által okozott korrózió vizsgálata repedésmentes beton esetén

6.2.1. Teljes valószínűségi eljárás

A tervezési folyamat első lépése ez esetben is a vizsgált határállapot kijelölése. Jelen esetben: az **acélbetétek depassziválódása**.

Alapegyenlet:
$$p\{\} = p_{dep} = p\{C_{crit} - C(a, t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (6.17)$$

Ahol:

$p\{\}$:	a depassziválódás előfordulási valószínűsége
C_{crit} :	kritikus klorid-koncentráció
$C(a, t_{SL})$:	klorid-koncentráció az a mélységben és t_{SL} időpillanatban
a :	betonfedés [mm]
t_{SL} :	tervezett használati élettartam [év]
p_0 :	meghatározott hibahatár

A képletben szereplő C_{crit} és $C(a, t_{SL})$ változók teljes valószínűségi módszerrel határozhatók meg.

Szövegesen megfogalmazva a feltételt: annak valószínűsége, hogy a klorid-koncentráció a betonfedés mélységében, a tervezett használati élettartam végén meghaladja a kritikus klorid-koncentrációt, kisebb kell, hogy legyen egy megengedett p_0 értéknél.

A kritikus klorid-koncentráció a befolyásoló paramétereivel együtt a következő képlettel határozható meg:



8. ábra: Kloridok által okozott korrózió eredménye

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{S, \Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app, C} \cdot t}} \right] \quad (6.18)$$

Ahol:

C_{crit} :	kritikus klorid-koncentráció [%]
$C(x, t)$:	aktuális klorid-koncentráció az $x=0m$ mélységben (betonfelületen), a t időpillanatban [%]
C_0 :	a kezdeti klorid-koncentráció a betonban [%]
$C_{S, \Delta x}$:	az adott t időpillanatban, Δx mélységben mért klorid-koncentráció
x :	a vonatkozó klorid-tartalomhoz ($C(x, t)$) tartozó mélység [mm]

a:	a betonfedés értéke [mm]
Δx :	a konvekciós zóna mélysége (betonréteg, ameddig a klorid-behatolás folyamata eltér a Fick 2. törvénye szerinti diffúziótól) [mm]
$D_{app,C}$:	látszólagos klorid-diffúziós együttható [$\text{mm}^2/\text{év}$]
t:	eltelt idő [év]
erf:	hiba függvény

A klorid-koncentrációt és behatolást a DuraCrete [3] és a kissé módosított DARTS [7] kutatásokon belül modellezték. Ezekon kívül több modell is készült, amelyek különböznek például a betonfelület kezelése szempontjából. Ezek megfelelő korrekciókkal szintén felhasználhatók. A mai napig folynak kutatások, melyeknek fő célja a klorid behatolás modellezése. Ezek az érvényességi tartomány meghatározása után a bemutatott módszerhez hasonlóan alkalmazhatóak lesznek.

A bemutatott modell Fick 2. törvényét [5] veszi alapul, amely figyelembe veszi a legtöbb megfigyelést, miszerint a kloridok mozgása a betonban ismert szétterjedésű. A felület gyakran a nedvesedés-változásnak és a későbbi párolgásnak van kitéve. Ezt a rész általában konvekciós zónaként említjük, mivel ebben a zónában a klorid-transzport nem kontrollált, így a Fick 2. törvénye szerinti diffúziós hozam nem egyezik pontosan a konvekciós zónában mérttel. Annak érdekében, hogy a klorid behatolást időszakos terhelésre továbbra is le tudjuk írni, Fick 2. törvényét felhasználva: a konvekciós zóna adatait - amelyek eltérhetnek az ideális diffúziós viselkedéstől - elhanyagoljuk, és Fick 2. törvényét alkalmazva egy Δx mélységgel és egy helyettesítő felszíni koncentrációval számolunk. A Δx a konvekciós zóna mélységét jelöli. Ezzel az egyszerűsítéssel Fick 2. törvénye jó közelítés az $x \geq \Delta x$ mélység esetén. A látszólagos klorid-koncentrációs együttható az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (6.19)$$

Ahol:

k_e : környezeti szállítási változó [-], melynek számítása:

$$k_e = \exp\left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right) \quad (6.20)$$

Ahol:

b_e : regressziós változó [K]

T_{ref} : szabványos teszt hőmérséklet [K]

T_{real} : a szerkezeti elemet körülvevő levegő hőmérséklete [K]

$D_{RCM,0}$: klorid-migrációs együttható [mm^2/a]

k_t : szállítási paraméter [-]

$A(t)$: az „öregedést” figyelembe vevő függvény [-], melynek értéke:

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad (6.21)$$

Ahol:

a: az „öregedéshez” tartozó kitevő [-]

$D_{RCM,0}$ [$10^{-12}m^2/s$]	v/c_{eqv}					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Cement típus						
CEM I 42.5 R	-	8.9	10.0	15.8	19.7	25.0
CEM I 42.5 R+FA (k=0.5)	-	5.	6.9	9.0	10.9	14.9
CEM I 42.5 R+SF (k=2.0)	4.	4.	-	-	5.3	-
CEM III/B 42.5	-	1.4	1.9	2.8	3.0	3.4

7. táblázat: A klorid migrációs együttható szakirodalmi adatai

Szállítási paraméter (k_t) és „öregedési” kitevő (a)

A látszólagos diffúziós együttható ($D_{app,C}$) a kitettségi idő növekedésével csökken. Ennek figyelembe vételére vezetjük be a két változót: a szállítási paramétert és az „öregedési” kitevőt. A függvényi kapcsolat a kitettségi idő és a $D_{app,C}$ között három különböző cementtípus esetén a 8. táblázatban látható. A táblázat adatai a kitettségi tulajdonságok alapján alakultak: „freccsenési zóna”; „ár-apály zóna” és „előtöltött zóna”. Viszont a biztonság javára való törekvés indokoltá tette a „só-köd zóna” és „atmoszférikus zóna” vizsgálatát is. Ahhoz, hogy megkapjuk az a értékét, a k_t paramétert konstans értéknek: 1-nek kell felvenni. A referencia idő $t_0=0,0767$ év lett. (Ez 28 napot jelent)

Beton	„öregedési” kitevő (a)
portlandcement alkalmazásával CEM I; $0.40 \leq v/c \leq 0.60$	béta ($m=0.30$; $s=0.12$; $a=0.0$; $b=1.0$)
pernye-portlandcement alkalmazásával $f \geq 0.20z$; $k=0.50$; $0.40 \leq v/c_{eqv} \leq 0.62$	béta ($m=0.60$; $s=0.15$; $a=0.0$; $b=1.0$)
Kohósalak cement alkalmazásával CEM III/B; $0.40 \leq v/c \leq 0.60$	béta ($m=0.45$; $s=0.20$; $a=0.0$; $b=1.0$)

8. táblázat: Az "öregedési" kitevő értékei

Környezeti szállítási változó (k_e)

A környezeti szállítási változó a $D_{Eff,C}$ figyelembe vételekor a T_{real} hatásának bemutatása érdekében került bevezetésre. A k_e meghatározása a (6.20) képlettel történik. Ahol

- b_e : regressziós változó, mely normál eloszlású, értéke pedig 3500K és 5500K között változik. Várható értéke: 4800K, szórása: 700K
- T_{ref} : referencia hőmérséklet, a szabvány teszhőmérséklettel egyezik meg, értéke: 293K.
- T_{real} : a szerkezeti elem, vagy a környezetének átlag hőmérséklete. A T_{real} adatok a legközelebbi meteorológiai állomásról szerezhetők be.

Kezdeti klorid-tartalom (C_0)

A kezdeti klorid-tartalom nemcsak a szerkezet felszínéről bekerült kloridból származhat, hanem a beton készítése során alkalmazott anyagok: víz, cement klorid tartalmából is. Ez

különösen a tengeri környezetben lévő szerkezetek esetén jelentős, mivel ezeken a területeken a finom és durva szemcsék, illetve a víz jelentős klorid-tartalmú lehet.

A helyettesítő felület klorid tartalma ($C_{S,\Delta x}$)

A betonfelület (C_S) és a helyettesítő felület klorid tartalma ($C_{S,\Delta x}$) egyaránt egy Δx mélységben mért változó, amely az anyagtulajdonságoktól, geometriai kialakítástól és környezeti tulajdonságoktól függ. A figyelembe veendő anyagtulajdonságok: a kötőanyag típusa, beton összetétele. A környezeti hatást leíró legfontosabb változó a környező oldat egyenértékű klorid-koncentrációja. Emellett még a szerkezeti elemek geometriai kialakítása és a klorid forrástól való távolságuk lehet jelentős. A betonfelület és helyettesítő betonfelület klorid tartalma bizonyos vizsgálatok szerint időfüggő változók, ám a hosszú távú jóslatok miatt ez az időtől való függőség gyakorlati okokból nincs számításba véve. Az összes fent említett változónak közvetlen hatása van a betonfelület és a helyettesítő felület klorid tartalmára.

Potenciális klorid hatás (C_{eqv})

A potenciális klorid hatás a klorid forrás klorid tartalmától függ. Tengeri vagy tengerparti szerkezetek esetén a potenciális klorid hatás megegyezik a tengervíz természetes klorid tartalmával ($C_{0,M}$):

$$C_{eqv} = C_{0,M} \quad (6.22)$$

A jégmentesítő só következtében kloriddal szennyezett víz klorid-koncentrációja nagyobb változatosságot mutat, mint a tengervíz összehasonlítható klorid-koncentrációja ($C_{0,M}$). A potenciális klorid hatás megfelelő számszerűsítése elég bonyolult, főleg olyan szerkezetek esetében, amelyek klorid-hatásnak vannak kitéve a jégmentesítő sók által. Ilyen esetekben a változók a jégmentesítő só mennyiségét próbálják leírni, amit nehéz számszerűsíteni.

$$C_{eqv} = C_{0,R} = \frac{n \cdot c_{R,i}}{h_{S,i}} \quad (6.23)$$

Ahol:

$C_{0,R}$:	a kloriddal szennyezett víz átlagos klorid tartalma [g/l]
n:	a sózások számának átlagértéke egy évre vonatkozóan [-]
$c_{R,i}$:	a klorid terjedés átlagos mennyisége egy terjedés alkalmával [g/m ²]
$h_{S,i}$:	az esőből és elolvadt hóból származó víz mennyisége terjedési időszakra vonatkoztatva [l/m ²]

Anyagjellemzők

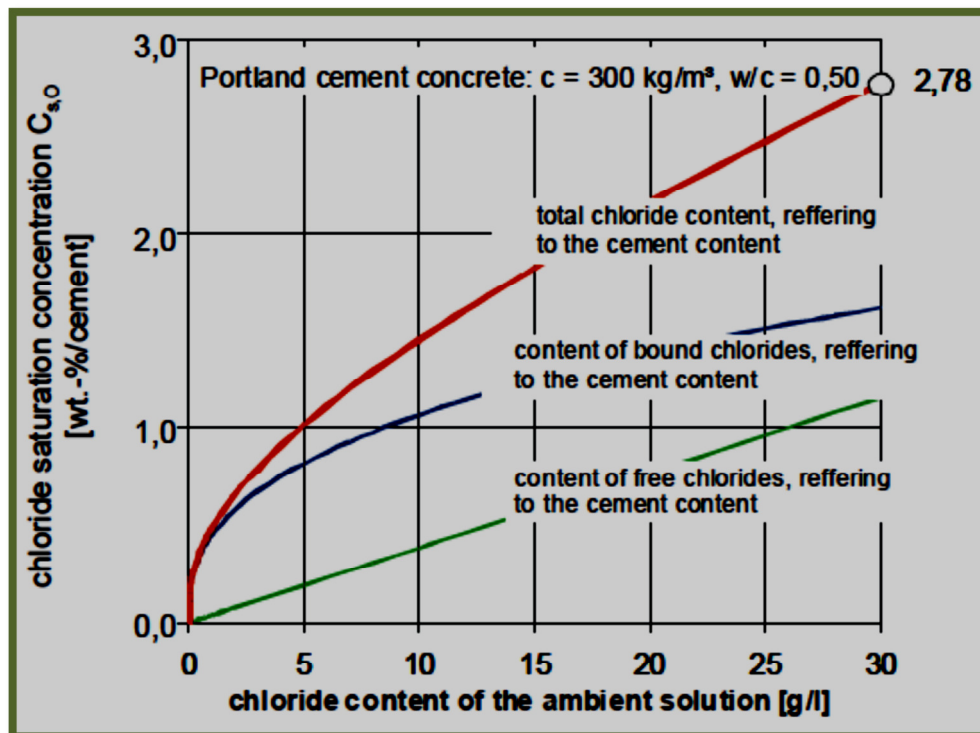
A következő anyagjellemzőket kell meghatározni annak érdekében, hogy a klorid-telítettséget ($C_{S,0}$) megkapjuk:

- ◆ a felhasznált cement típusához tartozó klorid adszorpciós izotermák
- ◆ a beton összetétele

A fenti összetevőknek jelentős hatása van az anyagban kialakuló fizikai és kémiai kötésekre, illetve a pórusok méreteire, amelyeknek telítődniük kell egészen addig, amíg a pórusokban mért klorid-koncentráció meg nem egyezik a külső környezetével.

Klorid telítettségi koncentráció ($C_{s,0}$)

A kötés-specifikus klorid adszorpció izotermák, betonösszetétel és a hatás szintjének nagyságrendje segítségével a telítettségi koncentráció meghatározható. A 9. ábra a portlandcement $C_{s,0}$ és C_{eqv} értékeinek összefüggéseit mutatja.



9. ábra: A potenciális klorid-hatás és a klorid telítettségi koncentráció kapcsolata

Állandó koncentrációjú, folyamatos klorid hatás alatt a $C_{s,0}$ értéke a beton felületén gyakran rövid időn belül a tervezett használati élettartamhoz tartozó értéket ér el. Így az az egyszerűsítés, hogy a C_s változó kezdetből fogva időben állandó, arra enged következtetni, hogy a beton például folyamatosan tengervíznek van kitéve. Ez a biztonság javára való egyszerűsítés.

Transzfer függvény (Δx)

Ha a szerkezeti elemek szakaszosan egy konstans oldatnak vannak kitéve, vagy változik a klorid-koncentráció, transzfer függvényt kell értelmezni. Az olyan szerkezeti elem esetében, amely szakaszosan kloriddal szennyezett oldattal van terhelve (megszakítva száraz időszakokkal, amikor a betonban lévő víz a felülethez közel párolog), minden későbbi újranedvesedés a kapillárisok szívó hatását idézi elő. Összehasonlítva a diffúziós folyamattal, a kapilláris folyamat egy olyan gyors szállításhoz vezet, amely során a kloridok a beton Δx mélységéig jutnak el, ott felhalmozódnak egészen addig, amíg a $C_{s,\Delta x} = C_{s,0}$ be nem következik. A Δx változót béta-eloszlással lehet jellemezni. A freccsenés típusától függően a klorid-behatolás átlagmélysége: $6\text{mm} \leq \Delta x \leq 11\text{mm}$. Olyan távolságban, ahol a felületi út nagyobb, mint 1,5 méter, a konvekciós zóna kialakulása nem érzékelhető,

vagyis $\Delta x = 0 \text{ mm}$. A szerkezet azon elemeinél, amelyek folyamatosan el vannak öntve, a klorid felszíni koncentrációja (C_s) megegyezik a klorid telítettségi koncentrációjával, amely gyakran spontán alakul ki. (Itt nem szükséges transzfer függvény vagy paraméter). Ahol ár-apály jelenségnek van kitéve a szerkezet, a Δx mélysége a Fick-féle megoldás szerinti hibahatáron belül lehet.

Összefoglalva a különböző kitétségi tulajdonságok szerint:

Δx	tengeri környezet	béta-eloszlás: $m=8,9$; $s=5,6$
Δx	előntött tengeri szerkezetek	konstans érték: 0
Δx	árvízi jelenségek, változó talajvíz	béta-eloszlás

Felület (C_s) és helyettesítő felület ($C_{s,\Delta x}$) klorid tartalma

A szerkezeti elemek klorid-szennyezettsége a „freccsenési” vagy a „só-köd” zónában a klorid-forrás távolságának csökkenésével növekszik. Ez függőleges és vízszintes értelemben is igazolt. Emellett egy elméletben időtől függő változót ($C_{s,\Delta x}(t)$) az egyszerűség kedvéért időtől függetlennek tekintünk.

Az olyan szerkezetek esetében, amelyekre a következők teljesülnek:

- ◆ elhelyezkedése: városi vagy vidéki táj
- ◆ a szerkezet élettartama ideje 5-40 év
- ◆ a beton: CEM I, v/c tényező 0,45 és 0,60 közötti

a klorid tartalom maximális értéke (C_{max}) a következő egyenlettel kapható meg:

$$C_{max}(x_a, x_c) = 0,465 - 0,051 \cdot \ln(x_a + 1) - (0,00065 \cdot (x_a + 1)^{-0,187}) \cdot x_h \quad (6.24)$$

Ahol:

C_{max} :	a maximális klorid-tartalom
x_a :	vízszintes távolság az útpadkától [cm]
x_h :	az út felülettől mért magasság [cm]

A kifejezés a fenti feltételeket teljesítő szerkezetekből szerzett tapasztalatok alapján alakult ki (a németországi környezeti adottságokhoz igazodva). Más betonkeverékek, vagy más kitételű szerkezetek esetén egy ehhez hasonló kifejezés határozható meg. A felfreccsenésnek kitétt szerkezetek esetében a $C_{s,\Delta x}(t)$ -et a maximális klorid-tartalomként lehet alkalmazni. A teszteredmények alapján az útfelület fölött 1,5 méternél magasabb betonszerkezetek esetén nincs Δx , itt a C_{max} megegyezik a betonfelületen lévő klorid-tartalommal (C_s). Ezen kitételek esetén a felületi klorid-tartalom ($C_{s,\Delta x}$) normál eloszlású. Elöntött szerkezet esetén a felületi klorid-tartalom (C_s) megegyezik a telítettségi klorid-tartalommal ($C_{s,0}$).

Kritikus klorid-tartalom (C_{crit})

Ebben a környezetben a kritikus klorid-tartalom a következőképpen határozható meg:

„A teljes Cl-tartalom, ami a teljes betonacél-felület depassziválódásához vezet és a vas oldódását idézi elő, nem függ az időjárástól – és a betonfelület látható korróziós károsodásához vezet.”

A kritikus klorid-tartalom alsó határértéke a $C_{crit,min}=0,20\%/c$ ment. Amennyiben az alsó határ ismert, és 0-tól különböző, célszerű egy korlátozott eloszlást alkalmazni a kritikus klorid-tartalom okozta korrózió leírására. A béta-eloszlás 0,20%-os alsó határral megfelelő lehet a leírásra, ahol a várható érték: $m=0,6\%$, a szórás: $s=0,15\%$.

6.2.2. Parciális tényezők módszere

A kloridok által okozott korrózió esetében is egy olyan tervezési módszer kidolgozása a cél, amely a mérnökök által a gyakorlatban egyszerűen, gyorsan használható. Így az acélbetétek depassziválódását tekintve határállapotnak, a teljesítendő feltétel: a betonfedés a mélységében egy adott t időpillanatban a klorid-koncentráció ne legyen nagyobb, mint a kritikus klorid-koncentráció. Ehhez a teljes valószínűségi módszert felhasználva szintén fel lehet írni az alapegyenletet (6.17), melyben a befolyásoló paraméterek változékonyságát parciális tényezőkkel vesszük figyelembe. Az alkalmazott parciális tényezők értéke a szükséges megbízhatóságtól, környezeti tulajdonságoktól és egyéb jellemzőktől függ. Ezek számszerűsítése még kísérleti fázisban tart.

6.3. Fagyási/olvadási károsodás jégolvasztó anyag nélkül - repedésmentes beton esetén

6.3.1. Teljes valószínűségi eljárás

A vizsgált határállapot a mechanikai tulajdonságok fagyási/olvadási károsodás miatt bekövetkező leromlása, illetve a lepattogzás, keresztmetszet-csökkenés.

Alapegyenlete:

$$p\{\} = p_{freeze/thaw\ damage} = p\{S_{CR} - S_{ACT}(t < t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (6.25)$$

Ahol:

$p\{\}$:	a fagyási/olvadási károsodás előfordulási valószínűsége
S_{CR} :	a kritikus telítettségi fok [-]
$S_{ACT}(t)$:	a telítettségi fok értéke a t időpillanatban [-]
t_{SL} :	tervezett használati élettartam [év]
p_0 :	meghatározott hibahatár

A képletben szereplő S_{CR} és $S_{ACT}(t)$ változók teljes valószínűségi módszerrel határozhatók meg.

Szövegesen megfogalmazva a feltételt: annak valószínűsége, hogy a tervezett használati élettartam vége előtt egy t időpillanatban a telítettségi fok értéke meghaladja a kritikus telítettségi fokot, kisebb kell, hogy legyen egy megengedett p_0 értéknél.

A fagyás okozta belső tönkremenetelt modellező valószínűségelméleti eljárás repedésmentes beton esetén kutatások sorozatán át fejlődött ki. Alapja az alábbi kifejezés, amelyben egy adott időponthoz tartozó kritikus és aktuális telítettségi fok van összehasonlítva – a tervezett élettartam alatt.



10. ábra: A fagyás hatása

$$g(S_{CR}, S_{ACT}(t < t_{SL})) = S_{CR} - S_{ACT}(t < t_{SL}) \quad (6.26)$$

A képletben szereplő változók magyarázata a (6.25) képletnél megtalálható.

A kifejezés alapja a betonban uralkodó transzport folyamat: a víz elnyelése a levegővel teli pórusokban. Ez azt feltételezi, hogy a kritikus telítettségi fok egy anyagtulajdonságtól függő érték, habár a beton élettartama során ez a kritikus fok számos változó függvénye.

A következőkben az alapegyenlet befolyásoló tényezőit, illetve azok meghatározásának módját ismertettem.

Kritikus telítettségi fok (S_{CR})

A kritikus telítettségi fok az adott beton laboratóriumi vizsgálatával határozható meg. Ennek oka, hogy a kritikus telítettségi fok nem becsülhető egy másik betontípus adatai alapján, sőt nem is hasonlíthatók össze különféle betonok kritikus telítettségi fokai. Az S_{CR} -t csak az adott beton aktuális telítettségi fokával (S_{ACT}) lehet összehasonlítani. Az említett laboratóriumi tesztek során próbatestek sorozatát juttatták vákuum-telítés és szárítás során különböző – 0,7 és 1 közötti – telítettségi fokokra. A próbatesteket elzárták, és egy vagy több fagyási-olvadási ciklusnak vetették alá. Fagyás előtt és után minden minta esetében meghatározták a dinamikus E-modulust, illetve a ciklusok során különböző telítettségi fokok esetén megmérték a próbatestek tágulását is. Ezen adatok – az E-modulus és tágulási értékek – változása alapján, mint a telítettség függvénye, meghatározható az a kritikus telítettségi fok, ahol a fagyás okozta tönkremenetel megkezdődik. A beton összetétele, beleértve a légpórusokat is, a tervezés során kerül meghatározásra. A kivitelezés során az aktuális betonösszetétel változó, és sokkal inkább tekinthető egy sztochasztikus változónak, mint egy konstans értéknek. Ezek alapján a következő eloszlás típusok lehetnek alkalmasnak a kritikus telítettség és szórás leírására:

- normál-eloszlás
- Weibull(min)-eloszlás
- Neville-eloszlás
- béta-eloszlás
- lognormális-eloszlás

Ezek közül általában a normál eloszlást alkalmazzák az S_{CR} meghatározására.

Aktuális (tényleges) telítettségi fok (S_{ACT})

Az aktuális telítettségi foknak a beton vízfelszívását tekinthetjük, mely tartalmazza a légpórusok vízfelszívását is. Az aktuális telítettségi fokot a következő kifejezéssel lehet meghatározni:

$$S_{ACT}(t < t_{SL}) = S_n + e \cdot t_{eq}^d \quad (6.27)$$

Ahol:

t_{eq} : a nedves, csapadékos napok egyenértékű ideje [nap]
 S_n, e, d : anyagjellemzők, kitevők

A vízfelszívás egyenértékű ideje (t_{eq})

A vízfelszívás egyenértékű ideje teljes mértékben a betonfelület mikroklímájától függ. A befolyásoló paraméterek: a felület esőnek, felfreccsenésnek való kitétsége, a száradás gyakorisága, időtartama és tulajdonságai. Az alábbi táblázat néhány fontos esetre ad t_{eq} értékeket. (9. táblázat)

Kitétség	t_{eq}	Megjegyzés
Elárasztott felület	t_{SL}	-
Vízszintes felület	4 hónap	azok a felületek, melyek a téli időszakban nedvesek
Függőleges felület	1 hét	olyan felületek, melyek esőnek vannak kitéve, de meg tudnak száradni

9. táblázat: A vízfelszívás egyenértékű ideje

Anyagtulajdonságok (S_n, e, d)

A felsorolt S_n, e és d paraméterek a víznek kitett beton vízfelszívási tulajdonságait írják le. A tényleges beton esetén ezeket a változókat kapilláris felszívás vizsgálatokkal határozzák meg. Az S_n paraméter a \sqrt{t} – skála tetőpontján mért telítettségi fokot jelenti. Az e és d paraméterek a vízfelszívás diagramjának tetőpont utáni leszálló ágát jellemzik egy logaritmikus skálán.

A különböző mechanikai tulajdonságok leromlása belső fagyási tönkremenetel következtében

A fent bemutatott modell esetében a fagyási tönkremenetel következményei a hagyományos tervezési módszerekben figyelembe vehetők a mechanikai tulajdonságok megváltoztatásával – például: rugalmassági modulus, szilárdsági, tapadási szilárdság beton és betonacél között.

6.3.2. Parciális tényezők módszere

A 6.3.1. szakaszban bemutatott teljes valószínűségi eljárásra épül. A parciális tényezők módszerének célja a korábbiakhoz hasonlóan egy olyan tartósságra való tervezési eljárás létrehozása, amely a fagyás által okozott tönkremenetelre vonatkozóan egyszerű számításokkal teszi lehetővé a tervezést anélkül, hogy a bemenő paraméterek valószínűségi eloszlásait figyelembe kellene venni. A következő egyenlet igazolásával teljesülnek a tartóssági követelmények:

$$S_{CR,d} - \Delta S_{cr} - (S_{ACT,d}(t < t_{SL}) + \Delta S_{ACT}) \geq 0 \quad (6.28)$$

Ahol:

$S_{CR,d}$:	a kritikus telítettségi fok tervezési értéke [-]
$S_{ACT,d}(t < t_{SL})$:	a tényleges telítettségi fok tervezési értéke a t időpillanatban [-]
t_{SL} :	használati élettartam [év]
ΔS_{CR} :	a kritikus telítettségi fok hibahatára [-]
ΔS_{ACT} :	a tényleges telítettségi fok hibahatára [-]

A fenti jellemzők tervezési értékeinek meghatározásához parciális biztonsági tényezőket kell definiálni, amelyek megfelelően illeszkednek az adott megbízhatósági szinthez, a paraméterek tulajdonságaihoz és jelentőségéhez.

A fagyás/olvadás okozta károsodás bekövetkezhet a jégolvadást elősegítő anyagok – sók – hatására is. Ezt a határállapotot vizsgálja a következő fejezetrész.

6.4. Fagyás és jégolvasztó sók által okozott felületi kérgesedés – repedésmentes beton esetén

6.4.1. Teljes valószínűségi eljárás

A vizsgált határállapot a só és fagy okozta felületi kérgesedés. A só és fagy okozta felületi kérgesedés modellezésére vonatkozó eljárás alapja a beton hőmérsékletének és az ellenállási hőmérsékletnek az összehasonlítása a tervezett használati élettartam alatt valamely t időpillanatban. A határállapot leírására szolgáló kifejezés:

$$g(T, T_R(t < t_{SL})) = T(t \leq t_{SL}, Cl) - T_R(RH(T), T(t), \dots) \quad (6.29)$$

Ahol:

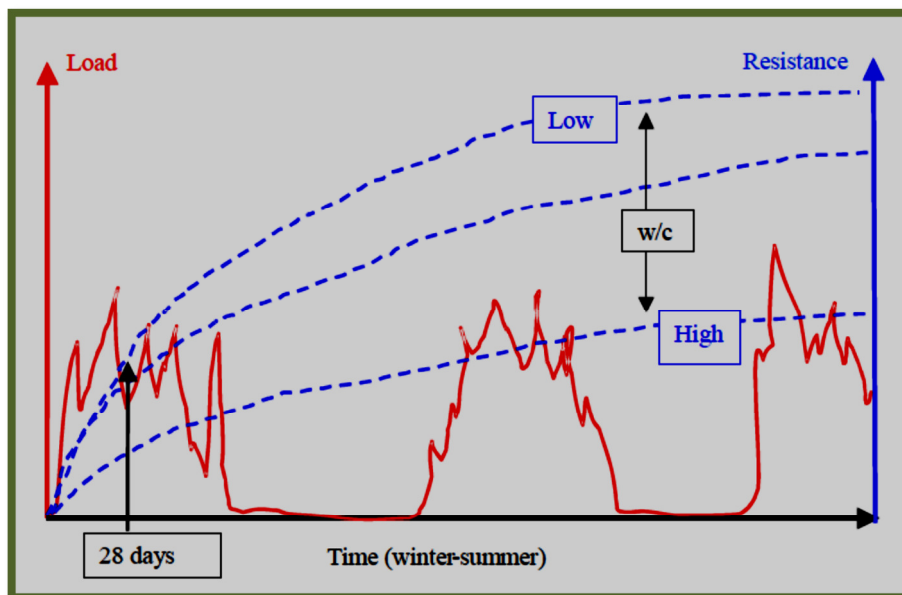
$T(t)$:	beton hőmérséklete [K]
t_{SL} :	tervezett használati élettartam [év]
$T_R(t)$:	a kritikus fagyási hőmérséklet, amelynél a felület kérgesedése bekövetkezik [K]
t :	eltelt idő [év]

A fenti egyenlet azon a feltételezésen alapul, hogy a lepattogzás ugyanabban a pillanatban kezdődik, amikor a betonfelület hőmérséklete egy kritikus érték alá csökken, ami az

ellenállási hőmérséklet (T_R). A lepattogzási ellenállás kritikus szintje a korrallal változik, és a beton kitettségtől és típusától függ.

A kritikus fagyási hőmérséklet, amelynél a lepattogzás bekövetkezik (T_R) – ellenállási hőmérséklet

Az ellenállási hőmérséklet a 28 napos korú beton laboratóriumi vizsgálatával határozható meg. Az elfogadott lepattogzási szintet a vizsgálat elvégzése előtt el kell dönteni. Az alkalmazandó beton összetételét – pórustartalmát – a tervezés során kell meghatározni. A tényleges betonösszetétel a kivitelezési gyakorlat alapján sokkal inkább egy sztochasztikus változónak, mint egy konstans értéknek tekinthető. Az ellenállási hőmérséklet meghatározásához különböző eloszlástípusokat alkalmazhatunk, például: normál-eloszlás, béta-eloszlás, Weibull (min)-eloszlás, lognormális-eloszlás, Neville-eloszlás. A lepattogzáshoz tartozó ellenállási hőmérséklet a korrallal és a szerkezet kitettségével változik. Ez az idővel való változás különböző betontípusoknál más és más jellegű. (11. ábra)



11. ábra: Az ellenállási hőmérséklet különböző betonösszetételek esetén az idő függvényében

Aktuális (tényleges) betonhőmérséklet ($T(t)$)

A környezeti hatás – $T(t)$ – különösen hideg téli éjszakákon a levegő hőmérsékletének és a szél, valamint a hosszú hullámú sugárzás miatt bekövetkező felfelé irányuló hőáramnak a következménye. A figyelembe veendő betonhőmérséklet az éjszaka a betonfelületen megjelenő sóhoz tartozik. A tényleges betonhőmérséklet – környezeti hatás – a következő kifejezéssel írható le:

$$T(t < t_{SL}) = T_{air} + \frac{\alpha_r}{\alpha_r + \alpha_{cv}} (T_{sky} - T_{air}) \quad (6.30)$$

Ahol:

T_{air} : a levegő hőmérséklete [K]

α_r :	a felület hővezető képessége a sugárzás következtében [W/(m ² K)]
α_{cv} :	a felület hővezető képessége a hőközlés, légáramlás következtében [W/(m ² K)]
T_{sky} :	a T_{air} -hez tartozó éghőmérséklet [K]

A levegő hőmérséklete (T_{air})

A legközelebbi meteorológiai állomás adatai használhatók bemenő adatként a levegő hőmérsékletének meghatározásához. A számszerűsíthetőség érdekében a meteorológiai központ extrém adatait – például hideg téli éjszakákról – ki kell értékelni. Az európai időjárás viszonyok esetén a normál-eloszlás alkalmas a T_{air} értékeinek leírására.

Felületi hővezető képesség (α_r és α_{cv})

A felület hővezető képessége sugárzás hatására függ a betonfelület hőmérsékletétől, a környező tér hőmérsékletétől, illetve a betonfelület emissziós tulajdonságától (ε). Képletbe foglalva a felületi hővezető képesség a következőképpen határozható meg:

$$\alpha_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \frac{(T_{sky} - T_{air})^3}{2} \quad (6.31)$$

Ahol

σ : Stefan-Boltzmann állandó, értéke: $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)], amely $\varepsilon=0,9$ emissziós értékhez tartozik

A felület hővezető képessége hőközlés hatására függ a betonfelület közelében mért szélességtől. Azokra az esetekre, amikor a szélesség értéke 5 m/s alatti érték, a hővezető képesség a következő képlettel számítható:

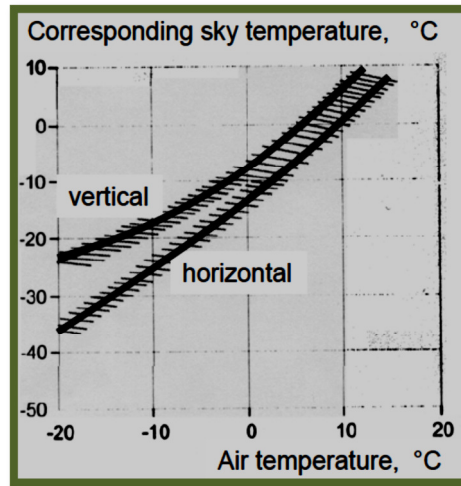
$$\alpha_{cv} = 6 + 4 \cdot u \quad (6.32)$$

Ahol

u : a mért szélesség [m/s]

A T_{air} -hez tartozó éghőmérséklet (T_{sky})

Az éghőmérséklet függ a betonfelület elhelyezkedésétől, a felhőktől, illetve a környező épületek árnyékoló hatásától. (12.ábra)



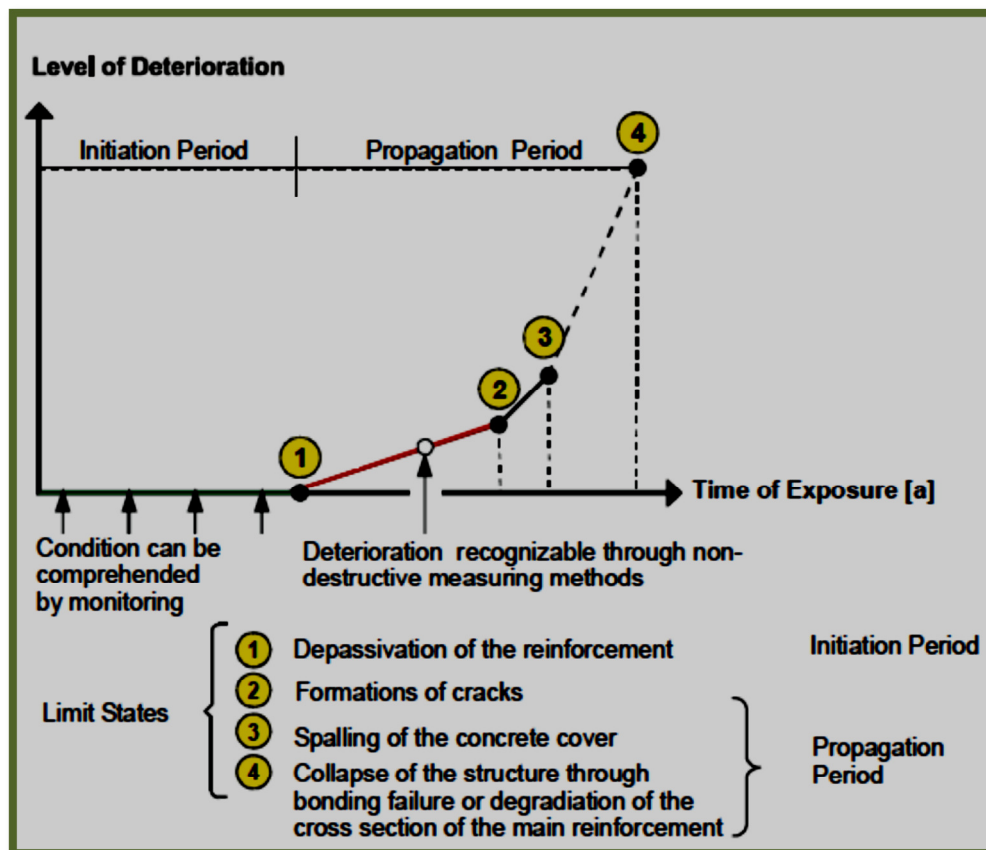
12. ábra: A levegő hőmérséklete (T_{air}) és a hozzá tartozó éghőmérséklet (T_{sky})

Meghatározása a következő kifejezéssel történhet:

$$T_{sky} = \begin{cases} 1,2 \cdot T_{air} - 14 & \text{vízszintes felület és tiszta ég esetén} \\ 1,1 \cdot T_{air} - 5 & \text{függőleges felület és tiszta ég esetén} \\ & T_{air} \text{ felhős ég esetén} \end{cases}$$

7. A használhatósági határállapottól a teherbírési határállapotig

A t_0 kezdeti időponttól (a szerkezet átadásától) nézve a szerkezet károsodási folyamata két szakaszra bontható: az első szakasz a szerkezet megépítésétől egészen a kijelölt használhatósági határállapotig tart, ami lehet a betonacélok depassziválódása, vagy a repedések megjelenése. Ezt a szakaszt kezdeti szakasznak nevezzük. A folyamat második szakasza az ún. terjeszkedési szakasz, amelyben a megindult károsodás már erőtni következményekkel jár, a szerkezet megbízhatósága csökken. A vasbetonszerkezetek korróziós folyamatának ezt a felosztását az alábbi ábra szemlélteti. [4]

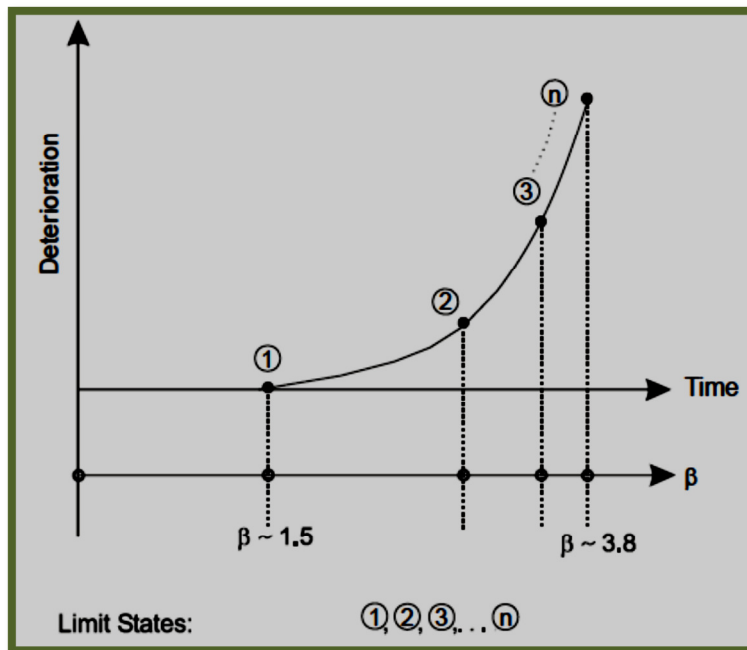


13. ábra: A korróziós folyamat szakaszai

A 13. ábrán 1-4-ig számozva láthatók a kijelölt határállapotok:

1. Acélbetétek depassziválódása
2. Repedések kialakulása
3. A betonfedés leválása
4. A szerkezet összeomlása

Attól függően, hogy a szerkezet megtervezése során milyen szerkezet megerősítési lehetőségek alkalmazását tették lehetővé a fenti károsodásokkal szemben, illetve milyen karbantartási, javítási munkálatokat lehet elvégezni a használati élettartam során: a határállapotokhoz rendelt megbízhatósági indexek is változnak. A β -index változását és a határállapotok kapcsolatát a 14. ábra szemlélteti.



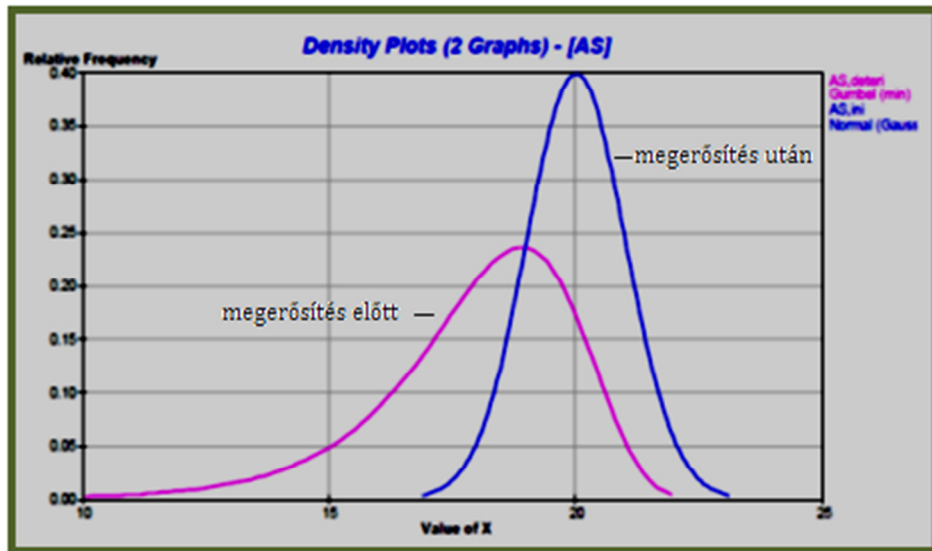
14. ábra: A megbízhatósági index és a határállapotok kapcsolata

A fentiek alapján a szerkezet tartóssági értékelését a használati élettartam alatt a kezdeti és terjeszkedési szakaszok során lezajló folyamatok és a szakaszok idejének összegzésével végezhetjük el.

A használati élettartam során bekövetkező károsodások a szerkezet megbízhatóságát csökkentik. Amennyiben a betonacélok korróziójára, vagy egyéb környezeti hatás okozta károsodására nincs a szerkezetben tervezett erőtani tartalék, a korábban használhatósági határállapotként definiált károsodások teherbírási tönkremenetelhez vezethetnek. A kezdeti szakasz végét jelentő depassziválódás a terjeszkedési szakaszban közvetlen teherbírás-csökkenést eredményez, ami a szerkezet tönkremeneteléhez vezet. Amennyiben a vasalás korróziójának előrehaladását nem zárhatjuk ki, és különböző beavatkozások - felülvizsgálat, karbantartás, javítás - nem végezhető el, minden esetben szerkezet-megerősítésre van szükség.

A szükséges többlet vasalás keresztmetszeti mérete – amely megnöveli a terjeszkedési szakasz időtartamát - nagyban függ attól a megbízhatóságtól, amelynél a depassziválódás kizárható. A depassziválódás bekövetkezéséig tartó periódus (kezdeti) hossza döntően a beton anyagminőségétől, illetve a betonfedés mértékétől függ. Tekintve, hogy a tervezett használati élettartam e két szakasz időtartamának összege, így a bennük szereplő paraméterek – a többlet megerősítés az egyik oldalon, a betonfedés és betonminőség a másik oldalon – optimalizálhatók. Ez azt jelenti, hogy minél magasabb a betonacélok depassziválódásának megbízhatósága, annál kisebb mértékű megerősítésre van szükség.

Kivétel nélkül minden esetben érvényes, hogy amennyiben a korrózió hatását szeretnénk kiegyenlíteni, a felhasznált többlet keresztmetszeti területnek meg kell egyeznie az eredeti keresztmetszet korrodálódott területével. Az alábbi grafikonon a megerősítés előtti és a megerősítés utáni betonacél keresztmetszetek sűrűségfüggvénye látható. (15. ábra)



15. ábra: A megerősítés előtti és megerősítés utáni betonacél keresztmetszetek sűrűségfüggvényei

Néhány esetben azonban nem elég csak a korróziós hatást kiegyenlíteni: például, ha a beton lepattogzását teherbírasi határállapotként kezelik, a korrodálódott keresztmetszeti terület kiegyenlítése mellett a lepattogzás elkerülését is biztosítani kell. Ez történhet a megengedett keresztmetszet-csökkenés mértékének szigorításával, vagy a megengedhető extra keresztmetszet méretének szabályozásával. Ez elkerülhetetlenül a terjeszkedési szakasz rövidüléséhez vezet. Következésképpen a kezdeti szakasz hosszabb lesz, ami azt jelenti, hogy a betonacélok depassziválódásához egy magasabb biztonsági szintet kell kijelölni.

A kezdeti és terjeszkedési szakasz hosszának meghatározása karbonátosodás miatti korrózió esetén

A kezdeti szakasz

A karbonátosodási mélység tervezett használati élettartam végére feltételezett értékét kell összehasonlítani a betonfedés értékével annak érdekében, hogy előrejelzést kapjunk a megbízhatóságról karbonátosodás okozta korrózió esetén. Ez a következő egyenlethez vezet a kezdeti szakasz esetében:

$$g(a, x_c(t_{SL})) = a - x_c(t_{SL}) = a - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})} \quad (7.1)$$

Ahol

a: a betonfedés értéke [mm]

$x_c(t_{SL})$: a karbonátosodási mélység a tervezett használati élettartam végén [mm]

Ha a (7.1) kifejezést átalakítjuk úgy, hogy a kezdeti szakasz hossza és a tervezett használati élettartam szerepeljen benne, a következőt kapjuk:

$$g(t_{ini}, t_{SL}) = t_{ini} - t_{SL} = \left(\frac{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_S}{a^2} \cdot t_0^{2 \cdot w} \right)^{\left(\frac{1}{2 \cdot w - 1} \right)} - t_{SL} \quad (7.2)$$

Ahol

t_{ini} : a karbonátosodáshoz tartozó kezdeti szakasz időtartama [év]

t_{SL} : a tervezett használati élettartam [év]

Ahhoz, hogy kiszámítsuk a depassziválódással szembeni megbízhatóságát a betonacéloknak a választott környezeti feltételek és anyagtulajdonságok mellett, a fenti határállapot egyenletét kell teljesíteni. A környezeti feltételeket leíró változók az adott környezeti osztálynak megfelelően vannak számszerűsítve. Az anyagtulajdonságok kiválasztása aszerint történik, hogy a betonacélok depassziválódásához tartozó megbízhatósági index tervezett élettartam végén (50 év után) elérje a $\beta_{depassziválódás}=1,3$ értéket.

A határállapot egyenletének megoldása különböző számítógépes programokkal [8] történhet.

A terjeszkedési szakasz

Az alábbi egyenletet kell kielégíteni ahhoz, hogy leírjuk a határállapotot, a $g(\dots) < 0$ esetén.

$$g(t_{ini}, t_{prop,i}, t_{SL}) = t_{ini} + t_{prop,i} - t_{SL} \leq 0 \quad (7.3)$$

Ahol

t_{ini} : a kezdeti szakasz időtartama [év]

$t_{prop,i}$: a terjeszkedési szakasz hossza a kijelölt eseményig, ami lehet lepattogzás, összeomlás... [év]

t_{SL} : tervezett használati élettartam [év]

A terjeszkedési szakasz hosszára vonatkozóan nincs konkrét számítási módszer. Szakemberek véleménye, vitái alapján a szerkezet környezeti feltételeit figyelembe véve egy becsült értéket vehetünk fel.

Emellett az EuroCode ajánlásait kell figyelembe venni, melyek környezeti osztályok és szerkezeti osztályok alapján különböző ajánlásokat tesznek a betonacélok és feszítőacél esetén.

A $c_{min,d}$ [mm] értéke betonacél esetén							
Szerkezeti osztály sorszáma	Környezeti osztály						
	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XS1	XD2 XS2 XF2	XD3 XS3 XF4
1	10	10	10	15	20	25	30
2	10	10	15	20	25	30	35
3	10	10	20	25	30	35	40
4	10	15	25	30	35	40	45
5	15	20	30	35	40	45	50
6	20	25	35	40	45	50	55

10. táblázat: Betonfedés ajánlott értékei betonacél esetén

A $c_{min,d}$ [mm] értéke feszítőacél esetén							
Szerkezeti osztály sorszáma	Környezeti osztály						
	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XS1	XD2 XS2 XF2	XD3 XS3 XF4
1	10	15	20	25	30	35	40
2	10	15	25	30	35	40	45
3	10	20	30	35	40	45	50
4	10	25	35	40	45	50	55
5	15	30	40	45	50	55	60
6	20	35	45	50	55	60	65

11. táblázat: Betonfedés ajánlott értékei feszítőacél esetén

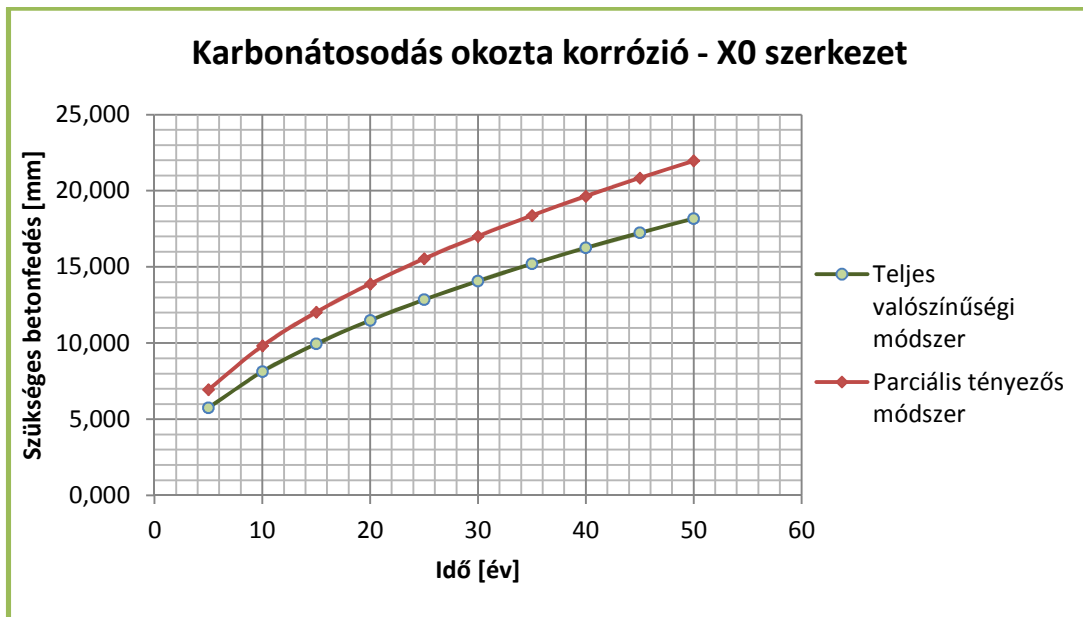
8. A módszer alkalmazása

Az ismertett tartósságra való tervezési eljárások segítségével a következőkben szeretném bemutatni és összehasonlítani a környezeti hatások figyelembevételi lehetőségeit a szerkezet megbízhatóságában. Ehhez egy feltételezett beltéri szerkezetet, egy kültéri csapóesőnek kitett szerkezetet, illetve egy hídszerkezetet vizsgállok.

Az előzőekben bemutatott teljes valószínűségi módszerek a bennük szereplő változók eloszlásainak kezelése miatt kézi számítás céljára nem alkalmazhatók. A teljes valószínűségi módszerek alkalmazásával kalibrált parciális tényező módszer kidolgozása azonban pontosan ezen okból, a kézi módszerekkel történő számítás megvalósíthatósága érdekében történt. Ennek tükrében tartósságra való tervezés gyakorlati példákon való bemutatását a következőképpen végzem el. A teljes valószínűségi módszerek összefüggéseiben szereplő paraméterek várható értékeinek felhasználásával megkaphatók a $\beta=0$ értékhez tartozó betonfedés értékek az összes vizsgált környezeti hatás esetére. A $\beta=1,3$ értéknek megfelelő megbízhatóság alkalmazása esetén ehhez képest szükséges többlet-betonfedés mértékét a karbonátosodás miatti korrózió esetére a 6.1.2. pontban szereplő parciális tényező módszerrel számítom ki. Így a karbonátosodás miatti korrózió esetén rendelkezésre álló $\beta=0$ -hoz és $\beta=1,3$ -hez tartozó betonfedés értékek aránya információval szolgál a vizsgált többi korróziótípus esetére is arról, hogy a $t_{\text{ini}}=t_{\text{SL}}$ tervezési élettartam esetén az előírt $\beta=1,3$ -nek megfelelő megbízhatóság esetén mekkora betonfedésre van szükség.

- ◆ Elsőként egy beltéri vasbetonszerkezetet vizsgáltam a karbonátosodás okozta korróziós hatásokkal szemben. A vizsgált határállapot a betonacélok depassziválódása volt, amely egyben a kezdeti korróziós szakasz végét is jelenti. A szerkezet jellemzői: C16/20-X0, víz-cement tényező: 0,5.

A kutatások eddigi állása alapján a teljes valószínűségi módszert alkalmaztam, a befolyásoló paraméterek valószínűségi eloszlását azonban kézi számítással nem lehet kezelni – speciális programokra lenne szükség. Így a [1] alapján a valószínűségi változók várható értékeit vettem alapul a számításhoz. A részletes számítás a *Számítási mellékletben* található, itt az eredmények kerülnek közlésre.

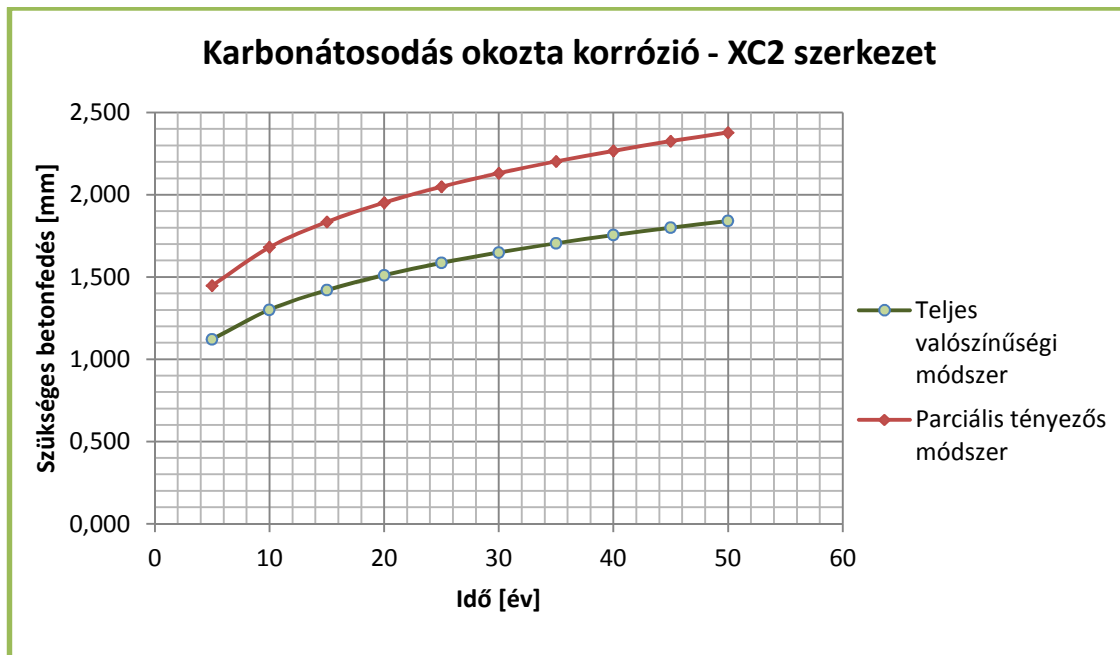


16. ábra: Karbonátosodás hatása X0 környezeti osztályú szerkezet esetében

A teljes valószínűségi módszer eredményei az 50 éves tervezett használati élettartamra vonatkozóan a 16. ábrán láthatók. A végeredmény szerint a tervezett élettartam végén körülbelül 18mm betonfedésre van szükség ahhoz, hogy a szerkezet teljesítse a vele szemben támasztott követelményeket. Ez az érték nem hasonlítható össze a jelenleg használatos szabványban szereplő ajánlott értékkel, tekintve hogy a teljes valószínűségi eljárás során csak a várható értékeket alkalmaztam, így a szükséges biztonságot a kapott értékek nem tartalmazzák. A [1] forrás segítségével – melyben már kidolgoztak egy parciális tényezős eljárást a karbonátosodás okozta korrózió esetére – elvégezhettem ugyanezen szerkezet vizsgálatát biztonsági tényezős módszerrel. A 16. ábrán szerepel a vizsgálat végeredménye, amelyből jól látható, hogy a teljes valószínűségi módszerrel kapott értékekhez képest a parciális tényezős módszerrel 18%-kal nagyobb betonfedés értékek adódnak. A parciális tényezős módszerrel kapott betonfedés értéke a tervezett 50 éves élettartam végére körülbelül 22mm. Így megállapítható a betonfedés-idő görbék alapján, hogy a $\beta = 1,3$ -hoz tartozó biztonság ebben az esetben 4 mm körül adódik.

- ◆ Második alkalommal egy kültéri, csapóesőnek kitett szerkezetet vizsgáltam a karbonátosodás okozta korrózióval szemben. A vizsgált határállapot a betonacélok depassziválódása volt.
A szerkezet jellemzői: C30/37-XC2, víz-cement tényező:0,4.

Először ezt a szerkezetet is a teljes valószínűségi módszer segítségével vizsgáltam, ahol a paraméterek valószínűségi tulajdonságait az előzőekben leírtaknak megfelelően a várható értékükkel vettem figyelembe. A tervezett 50 éves használati élettartam alatt szükséges betonfedés értékek az alábbi diagramon találhatóak. (17. ábra)

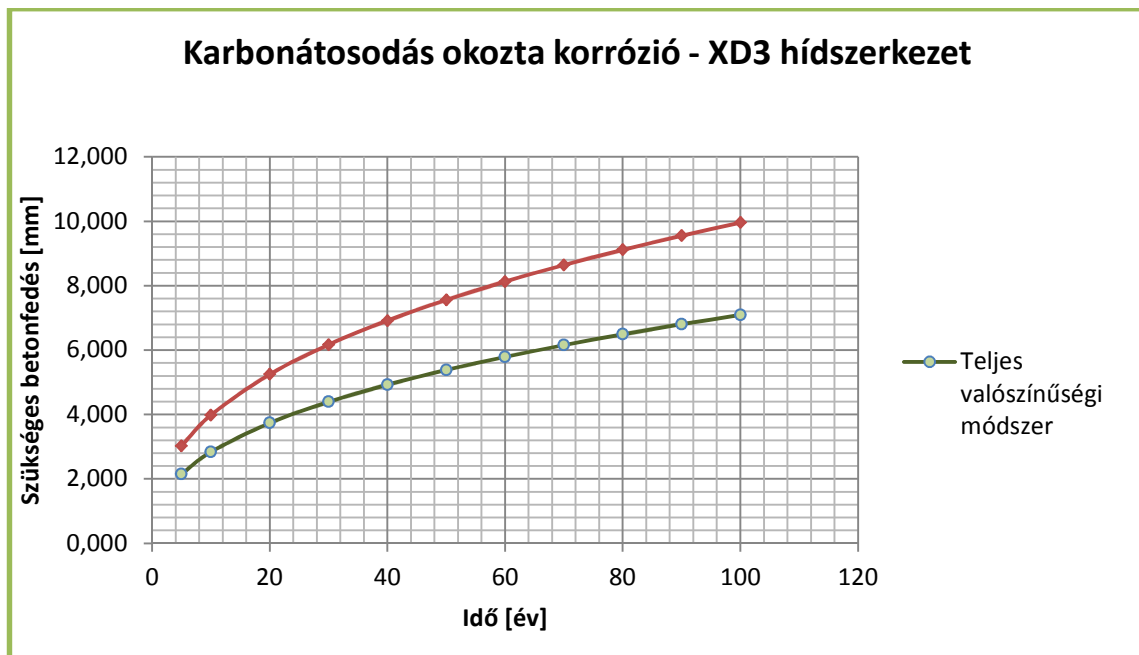


17. ábra: Karbonátosodás hatása XC2 környezeti osztályú szerkezet esetében

Az XC2 környezeti osztályú szerkezet esetében a teljes valószínűségi módszerrel kapott, $\beta=0$ -hoz tartozó eredmények jóval kisebb betonfedés értékeket adtak, mint az először vizsgált X0 osztályú szerkezetnél. Ennek elsődleges oka a nagyobb páratartalmú közegnek a karbonátosodás sebességét csökkentő (kedvező) hatásában keresendő. A teljes valószínűségi módszer mellett a parciális tényezős eljárással is elvégeztem a számítást, amelynek eredményei az alkalmazott biztonsági tényezőkkel a 17. ábra görbéin látható módon már a szerkezet szükséges biztonságát is tartalmazzák. Az ebben az esetben szükséges betonfedés-többlet körülbelül 0,5-1,0 mm.

- ◆ Harmadik szerkezetként egy 100 éves élettartamra tervezett hídszerkezetet vizsgáltam karbonátosodás okozta korrózióra. A vizsgált határállapot ez esetben is a betonacélok depassziválódása volt.
A szerkezet jellemzői: C40/50-XD3, víz-cement tényező: 0,4.

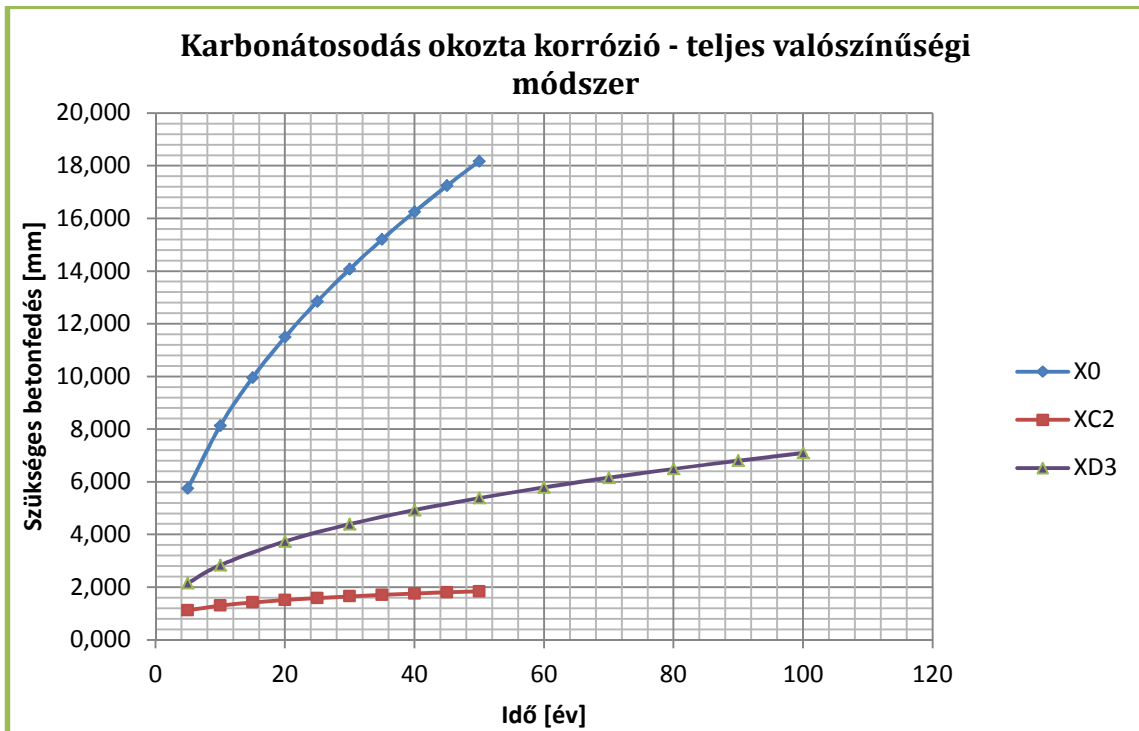
A vizsgálatot az előzőekhez hasonlóan teljes valószínűségi módszerrel és parciális tényezős módszerrel is elvégeztem. Az eredmények az alábbi diagramon láthatók. (18. ábra)



18. ábra: A karbonátosodás hatása XD3 környezeti osztályú szerkezet esetében

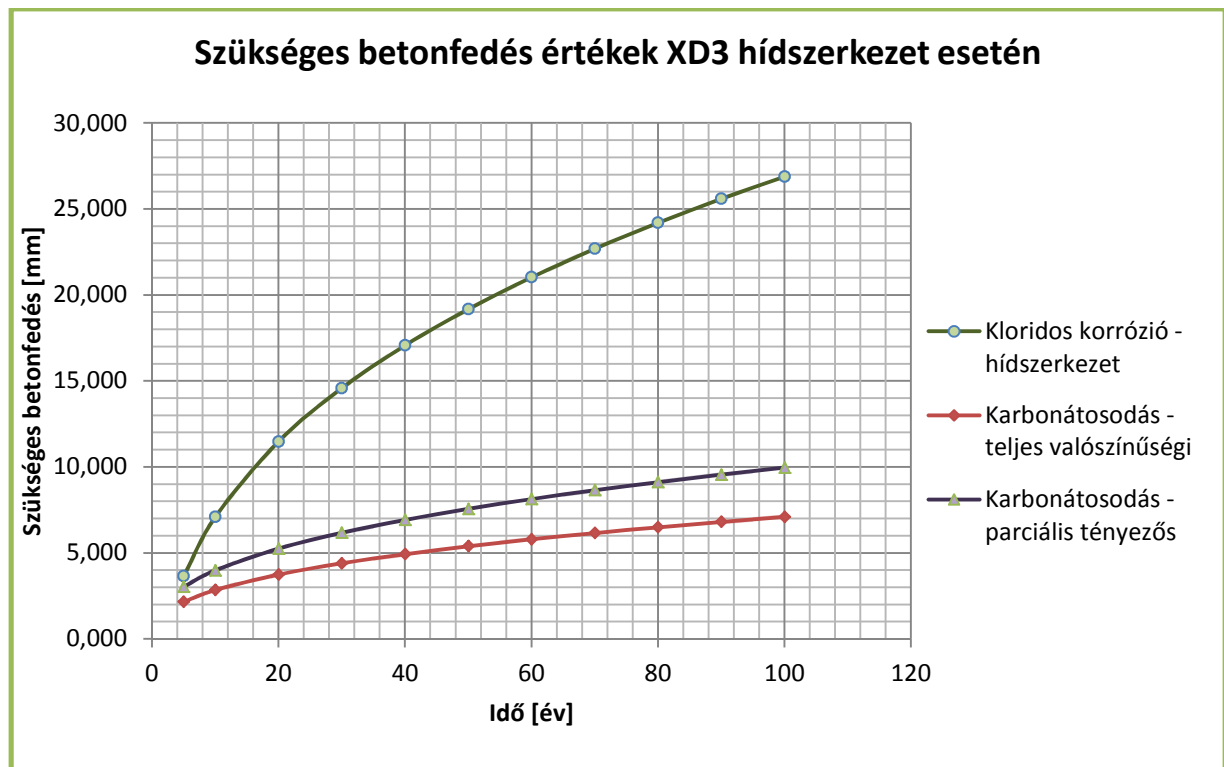
A parciális tényezők segítségével bevitt szerkezeti biztonság ez esetben körülbelül 3 mm.

A könnyebb összehasonlíthatóság kedvéért a három szerkezet-típust egy diagramon 19. ábra megmutatva elmondható, hogy a legnagyobb szükséges betonfedés értékek az első (X0 környezeti osztályú) szerkezet esetében adódtak. Ennek oka, hogy a karbonátosodás okozta korrózió folyamatát tekintve a legkedvezőtlenebb a beltéri, kis páratartalmú környezet.



19. ábra: Karbonátosodás hatása különböző szerkezetek esetén - teljes valószínűségi módszer

A karbonátosodás mellett a kloridok által okozott korrózió hatását is vizsgáltam. Ebben az esetben csak a teljes valószínűségi módszert tudtam alkalmazni, mivel a jelenlegi kutatások nem jutottak el a valószínűségi változók parciális tényezőkné való megfeleltetéséig. A vizsgált szerkezet az XD3 környezeti osztályú hídszerkezet. A számítás eredményei a következő diagramon (20. ábra) láthatók a korábbi karbonátosodás okozta korrózió eredményeivel együtt. A görbékből jól látható, hogy a hídszerkezet esetében a kloridok által okozott korrózió a mértékadó hatás. Ezek alapján a szükséges betonfedés értékre körülbelül 27 mm adódott.



20. ábra: Az XD3 környezeti osztályú hídszerkezet szükséges betonfedés értékei karbonátosodás és kloridok hatására

Fontos megjegyezni, hogy a fenti eredmények csak tájékoztató jellegűek, azokat tervezéshez közvetlenül felhasználni nem lehet.

A számítások célja a tartóssági tervezési eljárások bemutatása, illetve összehasonlítása volt. A vizsgálatok során kiderült, hogy a szerkezetek biztonságát kétféle módon kezelhetjük:

- ◆ a *teljes valószínűségi módszer* esetében a fizikai/kémiai folyamatot befolyásoló paraméterek valószínűségi eloszlásával – ezen belül is várható értékével és szórásával. Ez a módszer pontosabban követi a ténylegesen lezajló folyamatokat, ám a gyakorlatban nehezebben alkalmazható, mivel a valószínűségi változók függvényeinek kezelése csak számítógépes programokkal lehetséges. Ennek feloldása lehetséges egyrészt teljes valószínűségi módszeren belül maradván, - az alkalmazandó paraméterek (betonösszetétel, környezeti hatások, egyéb befolyásoló körülmények) teljes lehetséges értéktartományait figyelembe véve, előírányzott β megbízhatóság alkalmazásával elvégzett valószínűségi

számításokkal, majd az eredményeket táblázatos formában bocsátva a tervezők részére, vagy:

- ◆ a *parciális tényező módszer* alkalmazásával. Ekkor a szükséges biztonság bevitele parciális tényezők alkalmazásával történik, de ezek kalibrációját a teljes valószínűségi módszerrel kapott eredmények segítségével lehet elvégezni. A parciális tényező módszer alkalmazásával – módszerét tekintve – jelentősen egyszerűsödik a gyakorlati tervezés, ahogyan azt a karbonátosodás esetében be is mutattam. E területen a jelenlegi kutatások, fejlesztések témája is ez, vagyis a karbonátosodás mellett a többi említett környezeti hatás esetére a parciális tényezők meghatározása, és kalibrációja.

9. Összefoglalás, elért eredmények

A betonszerkezetek használati élettartamra való tartóssági tervezése területén a dolgozatban [1] alapján bemutatott módszerek és azok gyakorlati példákon való számszerű alkalmazása kapcsán elvégzett vizsgálataim és azok eredményei a következőképpen összegezhetők:

- ◆ Új tervezési módszert mutattam be ([1] alapján) a betonszerkezetek tartósságra való tervezése területén, amely felépítésében és a megbízhatóság kezelésében igazodik az erőtani tervezésben jelenleg alkalmazott méretezési módszerekhez. Eszerint a tartóssági követelmények is - a teherbírasi és a használhatósági követelményekhez hasonlóan - számszerű, zárt képletek formájában állnak rendelkezésre. Ezzel a jelenlegi tervezési szabványokban (így az Eurocode-ban is) alkalmazott, tapasztalatokon és megfigyeléseken alapuló, szerkesztési szabály jellegű előírások („deemed to satisfy” típusú módszerek) helyett méretezéselméleti értelemben a tartóssági követelmények is a teherbírásra és a használhatóságra vonatkozó erőtani követelményekkel azonos módon, válnak kezelhetővé
- ◆ Dolgozatomban betonszerkezetek esetére ismertettem a három leggyakoribb tartósságot befolyásoló környezeti hatást: a karbonátosodás okozta korróziót, a kloridok által okozott korróziót és a fagyás/olvadás okozta károsodást. Ismertettem e folyamatok befolyásoló paramétereit, majd azokat valószínűségi változóként kezelve megadtam a hozzájuk tartozó eloszlástípust és annak valószínűségi jellemzőit (várható értéket és szórást).
- ◆ Bemutattam a betonszerkezetek használati élettartamra való tartóssági tervezésének valószínűségelméleti és parciális tényezős változatát. E változatok a vizsgált folyamatokat azonos módon írják le, így méretezéselméleti értelemben egymás alternatíváinak tekinthetők, a különbség a szükséges megbízhatóság figyelembevételének módjában van. A teljes valószínűségi eljárás a korróziós folyamatot befolyásoló változókat valószínűségi változóként kezeli, ezért a szükséges matematikai apparátus miatt kézi számításra nem alkalmas. A parciális tényezős eljárás közvetlenül az egyes változók várható értékeihez rendel - az előirányzott megbízhatóságnak megfelelő - parciális tényezőket. Az összhang biztosítása miatt a parciális tényezők kalibrációja a teljes valószínűségi módszer alapján történik.
- ◆ A valószínűségelméleti és a parciális tényezős módszer párhuzamos alkalmazásával számszerű példákat dolgoztam ki a karbonátosodásra vonatkozóan többféle környezeti osztályba tartozó szerkezet esetén annak kimutatására, hogy a $\beta=1,3$ értékű megbízhatóság esetén milyen mértékű betonfedés-többlet szükséges a $\beta=0$ értékhez (50%-os alulmaradási valószínűség)

képest. A $\beta=0$ értékhez tartozó számításokat a többi korróziós folyamat esetére is elvégeztem.

- ◆ Bemutattam, hogy a betonszerkezetek korróziója két alapvető szakaszra – kezdeti és terjeszkedési szakasz - bontható. A kezdeti szakasz a korróziós folyamat olyan mértékű kifejlődéséig tart, mely a tartószerkezet megbízhatóságát erőtani értelemben még nem befolyásolja (pl. az acélbetétek depassziválódásáig). A terjeszkedési szakaszban a korrózió már a szerkezet megbízhatóságát csökkenti (pl. az acélbetétek korrózió miatti keresztmetszet-csökkenése miatt). Ezek szakaszok megfelelő figyelembevételével a tartóssági követelmények számszerűen is összehangolhatók a szerkezettervezéskor alkalmazott megbízhatóság értékével. Tekintve, hogy a korrózió kezdeti szakaszában még nem történik teherbírás-csökkenés, a szerkezet tervezéskor figyelembevett megbízhatóságának szinten tartására két lehetőség van. Egyrészt a kezdeti szakasz hosszának megnövelése – akár a tervezett használati élettartam végéig -, másrészt az élettartam során alkalmazott szerkezet-megerősítés, amely a korrózió terjeszkedési szakaszában bekövetkező teherbírás-csökkenést pótolja.
- ◆ A betonszerkezetekre bemutatott tartósságra való tervezési módszer fő gondolatmenete világos, ám annak gyakorlati alkalmazhatósága - a folyamatokat leíró változókról rendelkezésre álló statisztikai adatok korlátozott mennyisége miatt - egyelőre korlátozott. A továbbfejlesztés két irányban történhet: vagy e folyamatok meglévő szerkezeteken való megfigyelésén alapuló adatgyűjtéssel vagy erre vonatkozó célzott kísérleteken keresztüli adatgyűjtés révén.

Irodalomjegyzék

- [1] **International Federation for Structural Concrete (fib)**: Model Code for Service Life Design, *Switzerland, 2006*
- [2] **Farkas Gy.-Huszár T.-Kovács T.-Szalai K.**: Betonszerkezetek méretezése az Eurocode alapján - közúti hidak, épületek, *TERC Kft., 2006*
- [3] **The European Union-Brite EuRam III**: DuraCrete - Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures - Final Technical Report, *May 2000*
- [4] **Tutti, K.**: Corrosion of Steel in Concrete, Report No. 4., *Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden, 1983*
- [5] Fick's law of diffusion, url: http://en.wikipedia.org/wiki/Fick's_laws_of_diffusion
(megtekintés: 2012. 10. 8.)
- [6] Fick 1. törvénye, url:
<http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/fizkem/kerevf/FK2/TR1.pdf>
(megtekintés: 2012. 10. 8.)
- [7] **DARTS - Durable and Reliable Tunnel Structures**: Deterioration Modelling, *European Commission, 2004*
- [8] **RCP Consulting**: STRUREL, A Structural Reliability Analysis Program System, *RCP Consulting, Munich, 1995*

Ábrajegyzék

1. ábra: A használati élettartam alapú tervezés lépései.....	6
2. ábra: Karbonátosodás következtében korrodálódott vasbeton	13
3. ábra: Az utókezelés hatása	16
4. ábra: A természetes és laboratóriumi körülmények között lezajló karbonátosodás közötti összefüggés.....	17
5. ábra: Az inverz karbonátosodási ellenállás várható értéke és szórás közötti összefüggés.....	19
6. ábra: Az atmoszféra szén-dioxid-koncentrációja.....	20
7. ábra: A parciális tényezős módszer esetén alkalmazott jelölések.....	22
8. ábra: Kloridok által okozott korrózió eredménye	25
9. ábra: A potenciális klorid-hatás és a klorid telítettségi koncentráció kapcsolata.....	30
10. ábra: A fagyás hatása.....	33
11. ábra: Az ellenállási hőmérséklet különböző betonösszetételek esetén az idő függvényében....	36
12. ábra: A levegő hőmérséklete (T_{air}) és a hozzá tartozó éghőmérséklet (T_{sky}).....	38
13. ábra: A korróziós folyamat szakaszai.....	39
14. ábra: A megbízhatósági index és a határállapotok kapcsolata	40
15. ábra: A megerősítés előtti és megerősítés utáni betonacél keresztmetszetek sűrűségfüggvényei	41
16. ábra: Karbonátosodás hatása X0 környezeti osztályú szerkezet esetében	45
17. ábra: Karbonátosodás hatása XC2 környezeti osztályú szerkezet esetében	46
18. ábra: A karbonátosodás hatása XD3 környezeti osztályú szerkezet esetében	47
19. ábra: Karbonátosodás hatása különböző szerkezetek esetén - teljes valószínűségi módszer... 48	
20. ábra: Az XD3 környezeti osztályú hídszerkezet szükséges betonfedés értékei karbonátosodás és kloridok hatására.....	49

Táblázatok

1. táblázat: Tervezési élettartamok	4
2. táblázat: Szerkezetek kárhányad szerinti osztályozása	8
3. táblázat: A β ajánlott értékei az EC 0 szerint	9
4. táblázat: A β ajánlott értékei a különböző határállapotok esetén az EN 0 szerint.....	9
5. táblázat: Az inverz karbonátosodási ellenállás szakirodalmi adatai	19
6. táblázat: Az utókezelést jellemző tényező értékei.....	24
7. táblázat: A klorid migrációs együttható szakirodalmi adatai	28
8. táblázat: Az "öregedési" kitevő értékei	28
9. táblázat: A vízfelszívás egyenértékű ideje	34
10. táblázat: Betonfedés ajánlott értékei betonacél esetén	43
11. táblázat: Betonfedés ajánlott értékei feszítőacél esetén	43

Karbonátosodás okozta korrózió - teljes valószínűségi eljárás

Alapegyenlet:

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) = a - \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W(t)$$

Az egyenletben szereplő változók meghatározása - várható értékek alapján:

A vizsgált beltéri szerkezet: C16/20-X0, v/c=0,5

1. Tervezett használati élettartam

$$t := 50 \text{ yr}$$

2. Környezeti függvény

$$k_e = \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e}$$

$$RH_{real} := 35$$

$$RH_{ref} := 65$$

$$f_e := 5$$

$$g_e := 2.5$$

$$k_e := \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e} = 1.343$$

3. Kivitelezést jellemző tényező

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c}$$

Utókezelés ideje: $t_c := 7$

$$b_c := -0.567$$

$$k_c := \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c} = 1$$

4. Inverz karbonátosodási ellenállás

Alkalmazott cementtípus: CEM I 42.5 R

Víz-cement tényező: 0,5

$$R_{ACC.0} := 6.8 \cdot 10^{-11} \frac{\left(\frac{m^2}{s} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

$$R_{ACC.0_1} := R_{ACC.0} \cdot 1 = 2145.871 \frac{\left(\frac{mm^2}{yr} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

5. Csökkentő tényező

$$k_t := 1.25$$

6. Hiba tényező

$$\varepsilon_t := 315.5$$

7. CO₂-koncentráció

$$C_s := 0.00082 \frac{kg}{m^3}$$

8. Időjárás tényező

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}}$$

$t_0 := 0.0767 \text{ yr}$
 $ToW := 0$
 $p_{SR} := 0$
 $b_w := 0.446$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 1$$

A szükséges betonfedés-értékek számítása

5 év: $t := 5$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 5.747$$

10 év: $t := 10$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 8.127$$

15 év: $t := 15$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 9.953$$

20 év: $t := 20$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 11.493$$

25 év: $t := 25$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 12.85$$

30 év: $t := 30$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 14.076$$

35 év: $t := 35$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 15.204$$

40 év]

$$t := 40$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{\text{ACC.0.1}} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} \quad W = 16.254$$

45 év]

$$t := 45$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{\text{ACC.0.1}} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} \quad W = 17.24$$

50 év]

$$t := 50$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{\text{ACC.0.1}} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} \quad W = 18.172$$

Karbonátosodás okozta korrózió - parciális tényezős eljárás

Alapegyenlete:

$$x_{cd}(t_{SL}) = \sqrt{2} \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k_1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d} \sqrt{t_{SL}} W(t_{SL})$$

1. Tervezett használati élettartam

$$t_{SL} := 50 \text{ yr}$$

2. Környezeti függvény

$$k_{e,d} = \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real.k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e}$$

$RH_{real.k} := 35$
 $RH_{ref} := 65$
 $\gamma_{RH} := 1.3$
 $f_e := 5$
 $g_e := 2.5$

$$k_{e,d} := \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real.k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e} = 1.3563$$

3. Kivitelezést jellemző tényező

Utókezelés ideje: $t_c := 7$

Kivitelezést jellemző tényező: $k_{c,d} := 1$

4. Csökkentő tényező

$$k_{t,d} := 1.25$$

5. Inverz karbonátosodási ellenállás

Alkalmazott cementtípus: CEM I 42.5 R
 Vízcement tényező: 0,5

$$R_{ACC.0.k_1} := 6.8 \cdot 10^{-11} \frac{\left(\frac{m^2}{s} \right)}{\frac{kg}{m^3}} \quad R_{ACC.0.k_1.más} := R_{ACC.0.k_1} \cdot 1 = 2145.871 \frac{\left(\frac{mm^2}{yr} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

6. Biztonsági tényező

$$\gamma_R := 1.5$$

7. Hiba tényező

$$\varepsilon_{t,d} := 315.5$$

8. CO₂-koncentráció

$$C_{s,d} := 0.00082 \frac{kg}{m^3}$$

9. Időjárás tényező

$$W(t_{SL}) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}}$$

$$t_0 := 0.0767 \text{ yr}$$

$$ToW := 0$$

$$p_{SR} := 0$$

$$b_w := 0.446$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 1$$

A szükségesség betonfedés-értékek számítása

5 év: $t_{SL} := 5$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 6.947$$

10 év: $t_{SL} := 10$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 9.824$$

15 év: $t_{SL} := 15$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 12.032$$

20 év: $t_{SL} := 20$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 13.894$$

25 év: $t_{SL} := 25$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 15.534$$

30 év: $t_{SL} := 30$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 17.016$$

35 év: $t_{SL} := 35$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 18.38$$

$$\boxed{40 \text{ év:}} \quad t_{SL} := 40$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot \left(k_{t,d} \cdot R_{ACC.0.k.1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) \cdot C_{s,d}} \cdot \sqrt{t_{SL}} \quad W = 19.649$$

$$\boxed{45 \text{ év:}} \quad t_{SL} := 45$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot \left(k_{t,d} \cdot R_{ACC.0.k.1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) \cdot C_{s,d}} \cdot \sqrt{t_{SL}} \quad W = 20.84$$

$$\boxed{50 \text{ év:}} \quad t_{SL} := 50$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot \left(k_{t,d} \cdot R_{ACC.0.k.1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) \cdot C_{s,d}} \cdot \sqrt{t_{SL}} \quad W = 21.968$$

Karbonátosodás okozta korrózió - teljes valószínűségi eljárás

Alapegyenlet:

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) = a - \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W(t)$$

Az egyenletben szereplő változók meghatározása - várható értékek alapján:

A vizsgált kültéri szerkezet: C30/37-XC2, $v/c=0,4$

1. Tervezett használati élettartam

$$t := 50 \text{ yr}$$

2. Környezeti függvény

$$k_e = \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e}$$

$$RH_{real} := 62$$

$$RH_{ref} := 65$$

$$f_e := 5$$

$$g_e := 2.5$$

$$k_e := \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e} = 1.07$$

3. Kivitelezést jellemző tényező

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c}$$

Utókezelés ideje: $t_c := 7$

$$b_c := -0.567$$

$$k_c := \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c} = 1$$

4. Inverz karbonátosodási ellenállás

Alkalmazott cementtípus: CEM I 42.5 R
Víz-cement tényező: 0,4

$$R_{ACC.0} := 3.1 \cdot 10^{-11} \frac{\left(\frac{m^2}{s} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

$$R_{ACC.0_1} := R_{ACC.0} \cdot 1 = 978.265 \frac{\left(\frac{mm^2}{yr} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

5. Csökkentő tényező

$$k_t := 1.25$$

6. Hiba tényező

$$\varepsilon_t := 315.5$$

7. CO₂-koncentráció

$$C_s := 0.00082 \frac{kg}{m^3}$$

8. Időjárás tényező

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}$$

$t_0 := 0.0767 \text{ yr}$
 $ToW := 0.282$
 $p_{SR} := 1$
 $b_w := 0.446$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.158$$

A szükséges betonfedés-értékek számítása

5 év: $t := 5$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.305$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W = 1.121$$

10 év: $t := 10$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.25$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W = 1.301$$

15 év: $t := 15$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.223$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W = 1.42$$

20 év:

$$t := 20$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.206$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 1.511$$

25 év:

$$t := 25$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.193$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 1.586$$

30 év:

$$t := 30$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.183$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 1.649$$

35 év:

$$t := 35$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.175$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 1.705$$

40 év:

$$t := 40$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.169$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 1.755$$

45 év:

$$t := 45$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.163$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 1.8$$

50 év:

$$t := 50$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.158$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 1.841$$

Karbonátosodás okozta korrózió - parciális tényezős eljárás

Alapegyenlete:

$$x_{cd}(t_{SL}) = \sqrt{2} \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d} \sqrt{t_{SL}} W(t_{SL})$$

1. Tervezett használati élettartam

$$t_{SL} := 50 \text{ yr}$$

2. Környezeti függvény

$$k_{e,d} = \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real.k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e}$$

$RH_{real.k} := 62$
 $RH_{ref} := 65$
 $\gamma_{RH} := 1.3$
 $f_e := 5$
 $g_e := 2.5$

$$k_{e,d} := \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real.k}}{\gamma_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e} = 1.2787$$

3. Kivitelezést jellemző tényező

Utókezelés ideje: $t_c := 7$

Kivitelezést jellemző tényező: $k_{c,d} := 1$

4. Csökkentő tényező

$$k_{t,d} := 1.25$$

5. Inverz karbonátosodási ellenállás

Alkalmazott cementtípus: CEM I 42.5 R
 Víz-cement tényező: 0,4

$$R_{ACC.0.k.1} := 3.1 \cdot 10^{-11} \frac{\left(\frac{m^2}{s} \right)}{\frac{kg}{m^3}} \quad R_{ACC.0.k.1.más} := R_{ACC.0.k.1} \cdot 1 = 978.265 \frac{\left(\frac{mm^2}{yr} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

6. Biztonsági tényező

$$\gamma_R := 1.5$$

7. Hiba tényező

$$\varepsilon_{t,d} := 315.5$$

8. CO₂-koncentráció

$$C_{s,d} := 0.00082 \frac{kg}{m^3}$$

9. Időjárás tényező

$$W(t_{SL}) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(PSR \cdot ToW)^{b_w}}{2}}$$

$$t_0 := 0.0767 \text{ yr}$$

$$ToW := 0.282$$

$$PSR := 1$$

$$b_w := 0.446$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = 0.158$$

A szükséges betonfedés-értékek számítása

5 év: $t_{SL} := 5$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = 0.305$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot \left(k_{t,d} \cdot R_{ACC.0.k.1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) \cdot C_{s,d} \cdot \sqrt{t_{SL}}} \cdot W = 1.448$$

10 év: $t_{SL} := 10$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = 0.25$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot \left(k_{t,d} \cdot R_{ACC.0.k.1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) \cdot C_{s,d} \cdot \sqrt{t_{SL}}} \cdot W = 1.681$$

15 év: $t_{SL} := 15$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = 0.223$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot \left(k_{t,d} \cdot R_{ACC.0.k.1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) \cdot C_{s,d} \cdot \sqrt{t_{SL}}} \cdot W = 1.835$$

20 év: $t_{SL} := 20$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.206$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 1.952$$

25 év: $t_{SL} := 25$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.193$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 2.049$$

30 év: $t_{SL} := 30$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.183$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 2.131$$

35 év: $t_{SL} := 35$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.175$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 2.203$$

40 év: $t_{SL} := 40$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.169$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 2.267$$

45 év: $t_{SL} := 45$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.163$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 2.326$$

50 év: $t_{SL} := 50$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.158$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 2.379$$

Karbonátosodás okozta korrózió - teljes valószínűségi eljárás

Alapegyenlet:

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) = a - \sqrt[2]{k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W(t)$$

Az egyenletben szereplő változók meghatározása - várható értékek alapján:

A vizsgált hídszerkezet: C40/50-XD3, $v/c=0,4$

1. Tervezett használati élettartam

$$t := 100 \text{ yr}$$

2. Környezeti függvény

$$k_e = \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{\text{real}}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{\text{ref}}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e}$$

$$RH_{\text{real}} := 70$$

$$RH_{\text{ref}} := 65$$

$$f_e := 5$$

$$g_e := 2.5$$

$$k_e := \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{\text{real}}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{\text{ref}}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e} = 0.859$$

3. Kivitelezést jellemző tényező

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c}$$

Utókezelés ideje: $t_c := 7$

$$b_c := -0.567$$

$$k_c := \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c} = 1$$

4. Inverz karbonátosodási ellenállás

Alkalmazott cementtípus: CEM I 42.5 R

Víz-cement tényező: 0,4

$$R_{ACC.0} := 3.1 \cdot 10^{-11} \frac{\left(\frac{m^2}{s} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

$$R_{ACC.0_1} := R_{ACC.0} \cdot 1 = 978.265 \frac{\left(\frac{mm^2}{yr} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

5. Csökkentő tényező

$$k_t := 1.25$$

6. Hiba tényező

$$\varepsilon_t := 315.5$$

7. CO₂-koncentráció

$$C_s := 0.00082 \frac{kg}{m^3}$$

8. Időjárás tényező

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}}$$

$t_0 := 0.0767 \text{ yr}$
 $ToW := 0.282$
 $p_{SR} := 0.1$
 $b_w := 0.446$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.482$$

A szükséges betonfedés-értékek számítása

5 év: $t := 5$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.654$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 2.152$$

10 év: $t := 10$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.609$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 2.836$$

20 év: $t := 20$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.568$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 3.737$$

30 év:

$$t := 30$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.545$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 4.392$$

40 év:

$$t := 40$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.529$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 4.925$$

50 év:

$$t := 50$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.517$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 5.383$$

60 év:

$$t := 60$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right) \frac{(p_{SR} \text{ ToW})^{b_w}}{2} = 0.507$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2} k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s \sqrt{t} W = 5.788$$

70 év:

$$t := 70$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.5$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W = 6.154$$

80 év:

$$t := 80$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.493$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W = 6.49$$

90 év:

$$t := 90$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.487$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W = 6.802$$

100 év:

$$t := 100$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t} \right)^2 \frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2} = 0.482$$

A szükséges betonfedés értéke:

$$x_c := \sqrt{2 k_e k_c \left(k_t R_{ACC.0.1} + \varepsilon_t \right) C_s} \sqrt{t} W = 7.093$$

Karbonátosodás okozta korrózió - parciális tényezős eljárás

Alapegyenlete:

$$x_{cd}(t_{SL}) = \sqrt{2} k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d} \sqrt{t_{SL}} W(t_{SL})$$

1. Tervezett használati élettartam

$$t_{SL} := 100 \text{ yr}$$

2. Környezeti függvény

$$k_{e,d} = \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real.k}}{\gamma_{RH} 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e}$$

$RH_{real.k} := 70$
 $RH_{ref} := 65$
 $\gamma_{RH} := 1.3$
 $f_e := 5$
 $g_e := 2.5$

$$k_{e,d} := \left[\frac{1 - \left(\frac{RH_{real.k}}{\gamma_{RH} 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right]^{g_e} = 1.2123$$

3. Kivitelezést jellemző tényező

Utókezelés ideje: $t_c := 7$

Kivitelezést jellemző tényező: $k_{c,d} := 1$

4. Csökkentő tényező

$$k_{t,d} := 1.25$$

5. Inverz karbonátosodási ellenállás

Alkalmazott cementtípus: CEM I 42.5 R
 Víz-cement tényező: 0,4

$$R_{ACC.0.k.1} := 3.1 \cdot 10^{-11} \frac{\left(\frac{m^2}{s} \right)}{\frac{kg}{m^3}} \quad R_{ACC.0.k.1.más} := R_{ACC.0.k.1} \cdot 1 = 978.265 \frac{\left(\frac{mm^2}{yr} \right)}{\frac{kg}{m^3}}$$

6. Biztonsági tényező

$$\gamma_R := 1.5$$

7. Hiba tényező

$$\varepsilon_{t,d} := 315.5$$

8. CO₂-koncentráció

$$C_{s,d} := 0.00082 \frac{kg}{m^3}$$

9. Időjárás tényező

$$W(t_{SL}) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}}$$

$$t_0 := 0.0767 \text{ yr}$$

$$ToW := 0.282$$

$$p_{SR} := 0.1$$

$$b_w := 0.446$$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.482$$

A szükséges betonfedés-értékek számítása

5 év: $t_{SL} := 5$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.654$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} W = 3.021$$

10 év: $t_{SL} := 10$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.609$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} W = 3.982$$

20 év: $t_{SL} := 20$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(p_{SR} ToW)^{b_w}}{2}} = 0.568$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} W = 5.247$$

30 év: $t_{SL} := 30$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.545$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 6.167$$

40 év: $t_{SL} := 40$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.529$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 6.915$$

50 év: $t_{SL} := 50$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.517$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 7.558$$

60 év: $t_{SL} := 60$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.507$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 8.127$$

70 év: $t_{SL} := 70$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right)^{\frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2}} = 0.5$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 \ k_{e,d} \ k_{c,d} \left(k_{t,d} \ R_{ACC.0.k.1} \ \gamma_R + \ \varepsilon_{t,d} \right) \ C_{s,d}} \ \sqrt{t_{SL}} \quad W = 8.641$$

80 év: $t_{SL} := 80$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right) \frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2} = 0.493$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 9.113$$

90 év: $t_{SL} := 90$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right) \frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2} = 0.487$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 9.551$$

100 év: $t_{SL} := 100$

$$W := \left(\frac{t_0}{t_{SL}} \right) \frac{(PSR \ ToW)^{b_w}}{2} = 0.482$$

$$x_{cd} := \sqrt{2 k_{e,d} k_{c,d} \left(k_{t,d} R_{ACC.0.k.1} \gamma_R + \varepsilon_{t,d} \right) C_{s,d}} \sqrt{t_{SL}} \quad W = 9.96$$

Kloridok által okozott korrózió - teljes valószínűségi eljárás

Vizsgált szerkezet: Hídszerkezet; C40/50-XD3, v/c:0,4

Alapegyenlete:

$$C_{\text{crit}} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app},c} t}} \right)$$

Változók meghatározása:

1. Látszólagos klorid-diffúziós együttható: $D_{\text{app},c} = k_e D_{\text{RCM},0} k_t A(t)$

Ahol:

$$k_e = e^{-\left[b_e \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_{\text{real}}} \right) \right]}$$

környezeti szállítási változó

$$b_e := 4800 \text{ K}$$

$$T_{\text{ref}} := 293 \text{ K}$$

$$T_{\text{real}} := 284 \text{ K}$$

$$k_e := e^{-\left[b_e \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_{\text{real}}} \right) \right]} = 0.595$$

Klorid - migrációs együttható: $D_{\text{RCM},0.1} := 8.9 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

$$D_{\text{RCM},0} := 1 D_{\text{RCM},0.1} = 280.857 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

Szállítási paraméter:

$$k_t := 1$$

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

$$t_0 := 0.0767 \text{ yr}$$

$$t := 100 \text{ yr}$$

$$a := 0.3$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t} \right)^a = 0.116$$

az "öregedést" figyelembe vevő tényező

$$D_{\text{app},c} := k_e D_{\text{RCM},0} k_t A = 19.429 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

2. Transzfer függvény

$$\Delta x := 8.9$$

3. Klorid-koncentráció

$$C_{s,\Delta x} = 0.465 - 0.051 \ln(x_a + 1) - \left[0.00065 (x_a + 1)^{-0.187} \right] x_h$$

$$x_a := 1 \quad x_h := 5$$

$$C_{s,\Delta x} := \left[0.465 - 0.051 \ln(x_a + 1) - \left[0.00065 (x_a + 1)^{-0.187} \right] x_h \right] = 0.427$$

4. Kritikus klorid-koncentráció

$$C_{\text{crit}} := 0.6$$

5. Kezdeti klorid-koncentráció

$$C_0 := 0$$

A szükséges betonfedés-értékek

5 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 5 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.286$$

$$D_{\text{app.c}} := k_e D_{\text{RCM.0}} k_t A = 47.727 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app.c}} t}}\right)$$

$$x_c = 3.638$$

10 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 10 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.232$$

$$D_{\text{app.c}} := k_e D_{\text{RCM.0}} k_t A = 38.767 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta x} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app.c}} t}}\right)$$

$$x_c = 7.081$$

20 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 20 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.188$$

$$D_{\text{app.c}} := k_e D_{\text{RCM.0}} k_t A = 31.488 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app},c} t}} \right)$$

$$x_c = 11.469$$

30 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 30 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t} \right)^a = 0.167$$

$$D_{\text{app},c} := k_e D_{\text{RCM},0} k_t A = 27.882 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app},c} t}} \right)$$

$$x_c = 14.574$$

40 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 40 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t} \right)^a = 0.153$$

$$D_{\text{app},c} := k_e D_{\text{RCM},0} k_t A = 25.576 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app},c} t}} \right)$$

$$x_c = 17.061$$

50 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 50 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t} \right)^a = 0.143$$

$$D_{\text{app},c} := k_e D_{\text{RCM},0} k_t A = 23.92 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app},c} t}} \right)$$

$$x_c = 19.17$$

60 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 60 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.136$$

$$D_{\text{app.c}} := k_{\dot{e}} D_{\text{RCM.0}} k_t A = 22.647 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app.c}} t}} \right)$$

$$x_c = 21.019$$

70 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 70 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.129$$

$$D_{\text{app.c}} := k_{\dot{e}} D_{\text{RCM.0}} k_t A = 21.624 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app.c}} t}} \right)$$

$$x_c = 22.678$$

80 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 80 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.124$$

$$D_{\text{app.c}} := k_{\dot{e}} D_{\text{RCM.0}} k_t A = 20.774 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app.c}} t}} \right)$$

$$x_c = 24.189$$

90 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 90 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.12$$

$$D_{\text{app.c}} := k_e D_{\text{RCM.0}} k_t A = 20.053 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app.c}} t}}\right)$$

$$x_c = 25.581$$

100 év

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \quad t_0 := 0.0767 \text{ yr} \quad a := 0.3 \quad t := 100 \text{ yr}$$

$$A := \left(\frac{t_0}{t}\right)^a = 0.116$$

$$D_{\text{app.c}} := k_e D_{\text{RCM.0}} k_t A = 19.429 \frac{\text{mm}^2}{\text{yr}}$$

$$C_{\text{crit}} = C_{s,\Delta\dot{x}} \left(1 - \frac{x_c - \Delta x}{2 \sqrt{D_{\text{app.c}} t}}\right)$$

$$x_c = 26.876$$