



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

## **RAUDBETOONKONSTRUKTSIOONIDE KESTVUSE HINDAMINE TOIMIVUSPÕHISTE MUDELITEGA**

## **DURABILITY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH PERFORMANCE-BASED MODELS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jõrgen Vanamõisa

Üliõpilaskood:: 153913EATI

Juhendaja: Sander Sein, lektor

Tallinn 2021

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

24. mai 2021 a.

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

24. mai 2021 a.

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

24. mai 2021 a.

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Jörgen Vanamõisa (sünnikuupäev: 22.02.1996)

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse hindamine toimivuspõhiste mudelitega“,

mille juhendaja on Sander Sein,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

1. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

2. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

24. mai 2021 a.

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Jørgen Vanamõisa, 153913EATI

Õppekava, peeriala: EATI02/15, Teedehitus ja geodeesia

Juhendaja: Sander Sein, lektor, 53304077

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) RAUDBETOONKONSTRUKTSIOONIDE KESTVUSE HINDAMINE TOIMIVUSPÕHISTE MUDELITEGA

(inglise keeles) DURABILITY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH PERFORMANCE-BASED MODELS

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kestva betooni projekteerimine kehtivate standardite järgi ja süsteemi puudused
2. Toimivuspõhiste mudelite tutvustamine, lähteandmete valik ja analüüs

### Lõputöö etapid ja ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus   | Tähtaeg    |
|----|--|------------|
| 1. | Betoonkonstruktsioonide kestvuse hindamine ja kehtivate standardite puudused | 19.02.2021 |
| 2. | Toimivuspõhised mudelid kestvuse hindamiseks                                 | 19.03.2021 |
| 3. | Toimivuspõhiste mudelite analüüs   | 19.05.2021 |

**Töö keel:** EESTI

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 24. mai 2021 a.

**Üliõpilane:** Jørgen Vanamõisa ..... 19. jaanuar 2021 a.  
/allkiri/

**Juhendaja:** Sander Sein ..... 19. jaanuar 2021 a.  
/allkiri/

**Programmijuht:** Sander Sein ..... 19. jaanuar 2021 a.  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

|  |    |
|--|----|
| EESSÕNA .....  | 7  |
| SISSEJUHATUS .....   | 8  |
| 1 BETOONKONSTRUKTSIOONIDE KESTVUS .....  | 9  |
| 1.1 Konstruktsiooni keskkond ja keskkonnamõjurid .....                                 | 9  |
| 1.2 Konstruktsiooni kestvus .....  | 11 |
| 1.3 Konstruktsiooni kasutusiga .....   | 12 |
| 1.4 Keskkonnaklassid .....   | 13 |
| 1.5 Betooni kaitsekiht .....   | 17 |
| 1.6 Betoonkonstruktsioonide projekteerimine kehtivate standardite järgi .....          | 19 |
| 1.7 Kehtivate standardite puudused .....   | 21 |
| 2 TOIMIVUSPÕHISED MUDELID KESTVUSE HINDAMISEKS .....                                   | 24 |
| 2.1 Pärnu kesklinna sild .....   | 24 |
| 2.2 Karboniseerumisest põhjustatud korrosioon .....                                    | 26 |
| 2.2.1Projekteeritud eluiga $t_{SL}$ .....  | 26 |
| 2.2.2Betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus $R_{ACC,0}^{-1}$ .....              | 27 |
| 2.2.3Betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus $R_{NAC,0}^{-1}$ .....              | 28 |
| 2.2.4Keskkonnategur $k_e$ .....  | 29 |
| 2.2.5Ülekandetegur $k_c$ .....   | 32 |
| 2.2.6Keskkonnamõju $C_s$ (CO <sub>2</sub> kontsentratsioon) .....                      | 32 |
| 2.2.7Ilmategur $W(t)$ .....  | 34 |
| 2.2.8Temperatuur .....   | 36 |
| 2.3 Kloriidide põhjustatud armatuuri korrosioon .....                                  | 37 |
| 2.3.1Kriitiline kloriidisisaldus betoonis $C_{crit}$ .....                             | 38 |
| 2.3.2Esialgne kloriidisisaldus betoonis $C_0$ .....                                    | 38 |
| 2.3.3Kloriidi difusioonikoefitsent $D_{app,C}$ .....                                   | 39 |
| 2.3.4Kloriidi migratsioonikoefitsent $D_{RCM,0}$ .....                                 | 40 |
| 2.3.5Difusiooni temperatuurisõltuvuse parameeter $k_e$ .....                           | 41 |
| 2.3.6Vananemise alafunktsioon $A(t)$ .....   | 42 |
| 2.3.7Kloriidisisaldus betooni pinnal $C_{s0}$ ja $C_{S,\Delta x}$ .....                | 43 |
| 2.3.8Konvektsioonitsooni sügavus $\Delta x$ .....                                      | 43 |
| 3 TOIMIVUSPÕHISTE MUDELITE ANALÜÜS JA TULEMUSTE VÕRDLUS .....                          | 44 |
| 3.1 Pärnu kesklinna silla tekiplaadi projekteerimine kehtivate standardite järgi ..... | 44 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.2 | Karboniseerumismudeli analüüs .....                       | 45 |
| 3.3 | Kloriididest põhjustatud korrosiooni mudeli analüüs ..... | 52 |
|     | KOKKUVÕTE .....   | 57 |
|     | SUMMARY .....   | 60 |
|     | KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....                        | 63 |
|     | LISAD .....   | 67 |

## **EESSÕNA**

Käesoleva magistritöö pealkiri on „Raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse hindamine toimivuspõhiste mudelitega“.

Magistritöö teema valik kujunes välja autori ja töö juhendaja Sander Seina vaheliste ühiste arutelude käigus. Magistritöö eesmärgiks on tutvustada konstruktsioonide kestvuse hindamist hetkel kehtivate standardite järgi, juhtida tähelepanu süsteemi puudustele ning tutvustada ja analüüsida uut toimivuspõhist lähenemist konstruktsioonide projekteerimises, mis võimaldab tulevikus kestvust paremini hinnata.

Töö koostati suures osas Tallinnas. Lõputöö algandmete kogumisel oli abiks juhendaja Sander Sein.

Sooviksin tänada kõiki, kes töö valmimisele kaasa aitasid: juhendajat Sander Seina konstruktiivsete konsultatsioonide ja väga hea juhendamise eest ning Selektor Projekt OÜ'd võimaluse eest kasutada Pärnu kesklinna silla projekti magistritöö koostamiseks.

Võtmesõnad: betoon, raudbetoon, kestvus, toimivuspõhised mudelid, magistritöö

## SISSEJUHATUS

Betoonkonstruktsioonid leiavad tihedat rakendust erinevates ehitusvaldkondades. Ajalooliselt ehitusmaterjalina kasutatud betoon on aja möödudes asendatud armeeritud betooni ehk raudbetooniga. Raua asetamine betooni tekitab aga lisanduvaid probleeme, eriti pidades silmas konstruktsiooni kestvust.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on tutvustada konstruktsioonide kestvuse hindamist kehtivate standardite järgi, juhtida tähelepanu süsteemi puudustele ning tutvustada ja analüüsida uut toimivuspõhist lähenemist konstruktsioonide projekteerimises, mis võimaldab tulevikus kestvust paremini hinnata.

Magistritöö on jaotatud kolmeks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade betoonkonstruktsioonide projekteerimise standarditest, kus käsitletakse kestvust. Tutvustatakse konstruktsiooni projekteerimisprotsessi, mis keskendub seda ümbritseva keskkonna hindamisele ja õigete lähteandmete valikule. Peatüki lõpus antakse ülevaade kehtivate standardite nõuete puudustest, mis betoonkonstruktsiooni kestvust mõjutavad.

Teine peatükk keskendub uute toimivuspõhiste mudelite tutvustamisele ja lähteandmete täpsustamisele. Mudelid katsetatakse Pärnu kesklinna silla uue raudbetoonist tekiplaati projekteerimise näitel. Kõikide sisendandmete määramisel on arvestatud Pärnu piirkonna meteoroloogiliste iseärasustega ning hetkel Eesti tingimustes võimalike kasutatavate tsemendisegudega. Käesolevas töös on mudeli katsetamisel aluseks võetud Pärnu kesklinna sild, et oleks üks konkreetne asukoht ilmastikutingimuste ja muude lähteandmete määramisel. Kasutatavaid mudelid saab rakendada erinevate betoonkonstruktsioonide kestvuse modelleerimiseks, kui antud kohas on võimalik määrata mudelile vajalikke sisendandmeid.

Töö kolmandas peatükis analüüsitakse mudelite tulemusi, sealhulgas mudeli tegurite mõju lõpptulemusele. Juhitakse tähelepanu murekohtadele, mida tuleks enne toimivuspõhise lähenemise kasutuselevõttu lähemalt uurida. Mudelite katsetamisel saadud tulemusi võrreldakse kehtivate standardite järgselt projekteerides saadavate väärtustega, mille abil hinnatakse, kas praegune lähenemine tagab betoonkonstruktsioonide kestvuse.



# 1 BETOONKONSTRUKTSIOONIDE KESTVUS

Betoon on maailma ehitussektoris olnud sajandeid üks tähtsamaid materjale ja on seda tänapäevani. Ta leiab enim rakendust tsiviil- ja teedehituses, kus seda kasutatakse hoonete, teede, sildade ja muude rajatiste ehitamiseks. Betoon on ökonoomne - seda on lihtne kasutada, kavandada erineva kujuga ja vaatamata väidetele, et see ei ole „roheline“ materjal, on sellel väga madal CO<sub>2</sub> jalajälg [1].

Siiski on betoonkonstruktsioonide pikaajaline vastupidavus probleem, millega tuleb tegeleda. Eriti puudutab kestvuse probleem armeeritud betooni ehk raudbetooni, mis paikneb tänapäeval kiiresti muutuvates keskkonnatingimustes.

## 1.1 Konstruktsiooni keskkond ja keskkonnamõjurid

Raudbetoon on komposiitsüsteem, mille kasutamine on pikas perspektiivis optimaalne. Materjali omadustelt on betoonil ja terasel sarnased temperatuuripaisumise koefitsiendid - need deformeeruvad erinevatel temperatuuridel ühtemoodi ning ei reageeri üksteisega keemiliselt, seega on ka kahjulik korrosioon välistatud [2].

Rahvusvahelisel tasandil on betoonist infrastruktuuri kvaliteedi halvenemine üks raskemaid ja nõudlikumaid väljakutseid, millega ehitussektor kokku puutub [3]. Betoonkonstruktsioonide käitamine, hooldamine ja remont nõuab palju energiat ja ressursse ning tekitab suurt keskkonnakoormust ja suures koguses jäätmeid. Seega ei kujuta konstruktsioonide halb vastupidavus ja enneaegne kasutusea lõpp mitte ainult tehnilisi ja majanduslikke probleeme; see on ebaefektiivne loodusvarade kasutamine ning kujutab seega ka ohtu jätkusuutlikusele ja põhjustab muid ökoloogilisi probleeme [4].

Raudbetoonkonstruktsiooni kestvust mõjutavad enim keemilised ja füüsilised keskkonnamõjud. Seega tuleb betooni ja terase liitsüsteemi puhul hoolikalt arvestada ümbritsevat keskkonda, kuhu konstruktsiooni kavandatakse, sest materjal peab ettenähtud kasutusea jooksul püsima kasutuskõlblikuna.

Konstruktsiooni ümbritsev keskkond koosneb välis- ja sisekeskkonnas erinevatest mõjudest (õhk, vihm, temperatuur, saasteained, päikesekiirgus) ja teguritest

(õhuniiskus, hapnik), mis võivad mõjutada konstruktsiooni komponentide kestvust [Tabel 1.1].

Tabel 1.1 Näited keskkonnamõjudest [5] (Autori poolt kohandatud)

| Asukoht                          | Mõju  |
|----------------------------------|---|
| Väliskeskkond - atmosfäär        | Vihm, lumi või jää<br>Õhu koostisosad<br>Õhu saasteained<br>Tuul<br>Temperatuur ja niiskus<br>Päike   |
| Väliskeskkond – maapind või vesi | Vesi<br>Pinnase koostisosad<br>Pinnaselekked<br>Teesoolad   |
| Sisekeskkond                     | Temperatuur ja niiskus<br>Saastavad ained (nt. soolavesi autodelt)<br>Vesi (basseinid, lekked) ja kanalisatsioon<br>Ladustatavad kemikaalid<br>Kulumist põhjustavad tegevused |

Füüsilistest mõjuritest on betoonkonstruktsioonile ohtlikumad ekstreemsed temperatuurid ja niiskus, mis võivad põhjustada betooni pragunemise. Pragunenud betoon muutub kergesti kahjustatavaks, sest mööda pragusid tungib betooni nii vesi kui ka muud keemiliselt agressiivsed komponendid [6]. Pragude kaudu betooni sattunud vesi paisub madalal temperatuuril ja külmumis-sulamistsükli vaheldudes lõhub betoonkonstruktsiooni.

Keemilistest mõjuritest on betoonile kahjulikud erinevad ladustatavad kemikaalid ja talvisel teehooldusel kasutatavad soolad, mis lumesulamise abil satuvad betoonpindadele. Betooni pinnakihi tiheduse vähenemisel jõuab agressiivne keskkond läbi kaitsekihi suhteliselt lihtsalt armatuurini, mis toob kaasa selle korrodeerumise ja paisumise, mis omakorda lõhub armatuuri kaitsekihi lõplikult. Armatuuri korrodeerumise tagajärjel kaob vajalik side betooni ja armatuuri vahel ning väheneb armatuuri efektiivne töödiameter [6]. Keskkonnamõjurid nagu terase korrosioon, tsemendipõhiste materjalide mahukahanemine või külmumis-sulamistsüklid võivad viia konstruktsiooni kandevõime kaoni [5].

Terase korrodeerumine on üks olulisemaid põhjuseid, miks tänapäeva raudbetoonkonstruktsioonide seisukord halveneb. Selliselt kahjustatud konstruktsiooni remontimine või väljavahetamine on väga kulukas ning seetõttu tuleb raudbetoonkonstruktsioonide projekteerimisfaasis olla hoolikas ja võtta kasutusele meetmed, et ehitatav rajatis oleks kestav ja kuluefektiivne.

## 1.2 Konstruksiooni kestvus

Konstruksioon tuleb projekteerida ja ehitada nii, et see oleks säästlik, nõutava töökindluse astmega ning taluks kõiki ehituse ja kasutusea jooksul esineda võivaid koormusi ja mõjureid ning püsiks ettenähtud otstarbeks kasutuskõlblikuna. Lisaks kandevõimele ja kasutuskõlblikkusele tuleb projekteerimisel arvestada nõuetekohase kestvusega [7].

On oluline aru saada, mida peetakse silmas kestvuse all. Konstruksioonide, materjalide ja esemete kestvust saab defineerida erinevalt. Kaks Eestis kasutusel olevat Eurokoodi standardit (EVS-EN 1990 ja EVS-EN 1992) defineerivad kestvust järgnevalt:

- EVS-EN 1990 - Konstruksioon tuleb projekteerida nii, et tema seisundi halvenemine projekteeritud kasutusea jooksul ei kahjustaks konstruksiooni käitust rohkem kui eeldatud, arvestades keskkonda ja ettenähtud hooldustaset [7].
- EVS-EN 1992 – Kestev konstruksioon peab kogu oma projekteeritud kasutusea jooksul vastama kasutus-, tugevus- ja stabiilsusnõuetele ilma kasutatavuse olulise vähenemise ja liigse ettenägemata hoolduseta [8].

Kestvus ei ole mitte omadus, vaid raudbetoonkonstruksiooni võime, mis antakse läbi korrektse kontseptuaalse projekteerimise, planeerimise, materjalide valiku, põhjaliku ehituse ja hoolduse. Selline pingutus peaks olema osa mistahes raudbetoonist struktuuri esialgselt/kontseptuaalselt projekteerimisprotsessist [9].

Rahvusvahelises standardis ISO 13823:2008 „*General principles on the design of structures for durability*” on kirjeldatud konstruksioonide kasutusea prognoosi, mis põhineb kestvuse modelleerimisel ning lisaks kogemuslikule infole ka katsetustel ja kontseptuaalsetel matemaatilistel mudelitel. Juhul, kui konstruksioonile on ette nähtud minimaalne kasutusiga, tuleks olemasolevate konstruksioonide hindamisel ja uute projekteerimisel lähtuda antud dokumendi üldpõhimõtetest [5].

Standard EVS-EN 1990:2002 „Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused” kohaselt tuleb piisava kestvusega konstruksiooni valmistamiseks arvestada järgmisi tegureid [7]:

- Konstruksiooni ettenähtud või tulevikus eeldatav kasutus;
- Nõutavad arvutuskriteeriumid;

- Oodatavad keskkonnatingimused;
- Koostis, materjalide ja toodete omadused ja toimivus;
- Pinnase omadused;
- Konstruktsioonisüsteemide valik;
- Konstruktsioonielementide ja ühenduste kujundamine;
- Töö kvaliteet ja kvaliteediohje tase;
- Erilised kaitseabinõud;
- Ettenähtud hooldustööd projekteeritud kasutusea vältel.

### 1.3 Konstruktsiooni kasutusiga

Uute konstruktsioonide projekteerimisel tuleb määrata konstruktsioonile ettenähtud kasutusiga. Tavaliselt annab soovitatava kasutusea ette rajatise tellija/omanik. Monumentaalsete hoonete, sildade ja muude ehitustehniliste rajatiste korral soovitab standard EVS-EN 1990:2002 projekteeritud kasutusiga 100 aastat [7]. Projekteeritud kasutusiga (*design working life*) on eeldatav ajavahemik, mille kestel konstruktsioon või selle osa peab olema eesmärgi kohaselt kasutatav ettenähtud hooldusega, kuid ilma suurema remondivajaduseta [7].

Konstruktsiooni mistahes elemendi või komponendi kasutusiga ei saa olla suurem kui kogu süsteemile kavandatud kasutusiga [10]. Üksiku konstruktsiooni elemendi kasutusea lõppemine ei tähenda ilmtingimata terve konstruktsiooni kasutusea lõppu, kui eksisteerib võimalus element parandada või välja vahetada. Sillasüsteemi kasutusiga reguleerib selle kriitiliste elementide ja osade kasutusiga. Kriitiliseks elemendiks loetakse sellised osad, mis on sillale ettenähtud funktsiooni täitmiseks vajalikud [10]. Ehitise, tarindi või toote kasutusiga loetakse lõppenuks, kui objekt tuleb asendada, tugevdada/täiendada või remontida tarindite lõhkumise või ehitise kasutuse peatamisega [11].

Tänapäeval on olulised infrastruktuuri konstruktsioonid ettenähtud pikemaks kasutuseaks, kui praegustes EN standardites eeldatavad 50 aastat. Kuna puuduvad kogemused sellise pikkuse kasutuseaga konstruktsioonidega (raudbetoon on üpris hiljutine ehitussüsteem), millest õppida, on lahenduseks ennustavate mudelite kasutuselevõtt [12]. Sealjuures tuleks arvesse võtta järgnevaid aspekte [13]:

- Keskkond on pidevas muutuses (globaalne soojenemine ja sellega seotud äärmuslikud ilmastikunähtused);

- Ehitusmaterjalide valik on kiiresti muutuv (surve vähendada halba mõju keskkonnale);
- Ebapiisavad teadmised ja mudelid;
- Ehituskvaliteet;
- Erinevad arusaamad sellest, mida tähendab „kasutusiga“ ning „kasutuse lõpu“ kriteeriumite defineerimine.

## 1.4 Keskkonnaklassid

Keskkonnatingimused on keemilised või füüsilised tingimused, millele konstruktsioon peale mehaaniliste koormuste on allutatud. Standard EVS-EN 206 määrab betoonile mõjuvate keskkonnatingimuste väljendamiseks 6 keskkonnaklassi (*exposure class*).

**Keskkonnaklass X0** – Kasutatakse, kui betoon ei sisalda armatuuri (välja arvatud siis, kui esineb külmumine/sulamine, kulumine või betoon on kokkupuutes keemiliste mõjuritega). Standard lubab antud klassi kasutada ka armeeritud betooni korral, juhul kui tegemist on väga kuiva keskkonnaga. Klassi valikul eeldatakse, et korrosiooni- või muu oht konstruktsioonile puudub [Tabel 1.2].

**Keskkonnaklass XC** – Klassi kasutatakse juhul, kui armeeritud betoon puutub kokku õhu või niiskusega ning on oht betooni karboniseerumisest põhjustatud korrosiooniks. Klassinumbrid XC1-XC4 on eristatavad vastavalt sellele, kas on tegemist kuiva, märja või vahelduvalt kuiva-märja keskkonnaga [Tabel 1.2].

**Keskkonnaklass XD** - Kasutatakse, kui sarrust või tariraudu sisaldav betoon on kokkupuutes kloriidi, sealhulgas jäitevastaseid sooli sisaldava veega, mis ei pärine mereveest. Silla osadele, millele langevad kloriide sisaldavad piisad, tuleks rakendada suurimat klassid XD3 [Tabel 1.2].

**Keskkonnaklass XS** - Kasutatakse, kui armeeritud betoon puutub kokku mereveega või sooli sisaldava mereõhuga. Kaldal asuvatele konstruktsioonidele, mis ei ole otseses kokkupuutes mereveega, rakendatakse madalaimat klassi XS1. Mereehitiste osadele, mis paiknevad kõrgusel, kus betoon on vaheldumisi kontaktis merevee ja õhuga, rakendatakse suurimat klassi XS3 [Tabel 1.2].

Tabel 1.2 Keskkonnaklassid X0, XC, XD ja XS [14]

| Klassi tähis   | Keskkonna kirjeldus   | Näited keskkonnaklasside rakendamise kohta  |
|--|---|---|
| <b>1 Korrosiooni- või muu oht puudub</b>   |   |   |
| X0   | Kui betoon ei sisalda sarrust ega tariraudu: kõik tingimused, välja arvatud need, mille puhul esineb külmumine/sulamine, kulumine või keemilised mõjurid.<br>Kui betoon sisaldab sarrust või tariraudu: väga kuiv | Betoon väga kuiva õhuga siseruumides  |
| <b>2 Karboniseerumisest põhjustatud korrosioon</b>   |   |   |
| Kui sarrust või tariraudu sisaldav betoon puutub kokku õhu ja niiskusega, siis liigitatakse keskkonnatingimusi järgnevalt:   |   |   |
| XC1  | Kuiv või püsivalt märg  | Betoon madala õhuniiskusega siseruumides.<br>Pidevalt vee all olev betoon                               |
| XC2  | Märg, harva kuiv  | Kaua veega kontaktis olevad betoonpinnad.<br>Paljud vundamendid   |
| XC3  | Mõõdukalt niiske  | Betoon mõõduka või kõrge õhuniiskusega siseruumides.<br>Välisõhus olev vihma eest kaitstud betoon       |
| XC4  | Vaheldumisi märg ja kuiv  | Veega kokkupuutuvad pinnad, mis ei kuulu klassi XC2   |
| <b>3 Kloriidist (välja arvatud merevee kloriidid) põhjustatud korrosioon</b>   |   |   |
| Kui sarrust või tariraudu sisaldav betoon on kokkupuutes kloriidi, sealhulgas jätevastaseid sooli sisaldava veega, mis ei pärine mereveest, on keskkonnaklassid järgmised: |   |   |
| XD1  | Mõõdukalt niiske  | Betoonpinnad, millele langevad kloriide sisaldavad piisad   |
| XD2  | Märg, harva kuiv  | Ujumisbasseinid.<br>Betoon, mis on kokkupuutes kloriide sisaldava tootmisveega                          |
| XD3  | Vaheldumisi märg ja kuiv  | Konstruktsiooni osad, millele langevad kloriide sisaldavad piisad.<br>Sillutised, autoparklate paneelid |
| <b>4 Merevee kloriidist põhjustatud korrosioon</b>   |   |   |
| Kui sarrust või tariraudu sisaldav betoon on kokkupuutes mereveega või sooli sisaldava mereõhuga, on keskkonnaklassid järgmised:   |   |   |
| XS1  | Sooli sisaldav õhk, kuid mitte otsene kontakt mereveega   | Kaldal või selle lähedal asuvad konstruktsioonid  |
| XS2  | Vee all   | Mereehitiste osad   |
| XS3  | Loodete-, piisk- ja uduveevööndid   | Mereehitiste osad   |

**Keskkonnaklass XF** – Kasutatakse, kui betoon asub piirkonnas, kus ta on avatud rohketele külmumis/sulamistsüklikele. Püstsetele betoonpindadele, mis ei puutu kokku jätevastaste ainetega, antakse madalaim klass XF1 ning samade ainete mõjule avatud tee- ja sillakonstruktsioonidele klass XF4 [Tabel 1.3].

**Keskkonnaklass XA** – Kasutatakse, kui betoon puutub kokku erinevate keemiliste mõjuritega. Tabelis 1.3 on toodud erinevad keemilised karakteristikud ning nende piirväärtused, mille korral rakendatakse betoonile keskkonnaklasse XA1 - XA3 [Tabel 1.3].

Tabel 1.3 Keskkonnaklassid XF ja XA [14]

| Klassi tähis   | Keskkonna kirjeldus   | Näited keskkonnaklasside rakendamise kohta   |
|--|---|--|
| <b>5 Külmumise/sulamise mõju koos või ilma jätevastaste ainetega</b>   |   |  |
| Kui märjale betoonile mõjub nimetamisväärsel arvul külmumis/sulamistsükleid, on keskkonnaklassid järgmised:  |   |  |
| XF1  | Mõõdukalt veega küllastunud, ilma jätevastase aineta          | Vihma ja külma eest kaitsmata püstsed betoonpinnad   |
| XF2  | Mõõdukalt veega küllastunud, jätevastase ainega               | Teekonstruktsioonide püstsed betoonpinnad, mis on külmumise ja jätevastast ainet sisaldavate udupiiskade eest kaitsmata  |
| XF3  | Tugevasti veega küllastunud, ilma jätevastase aineta          | Vihma ja külma eest kaitsmata rõhtsad betoonpinnad   |
| XF4  | Tugevasti veega küllastunud, jätevastase ainega või mereveega | Jätevastaste ainete mõjule avatud tee- ja sillakatted.<br>Betonpinnad, mis on avatud jätevastaseid aineid sisaldavatele pritsmetele ja külma mõjule.<br>Pritsmete tsoonis asuvad külma mõjule avatud mererajatised |
| <b>6 Keemilised mõjurid</b>  |   |  |
| Kui betoonile toimivad tabelis 2 esitatud looduslikus pinnases ja pinnasevees esinevad keemilised mõjurid, siis vastavad keskkonnaklassid allpool toodutele: |   |  |
| XA1  | Madala keemilise agressiivsusega keskkond                     | Betoon, mis on avatud looduslikule pinnasele ja pinnaveele vastavalt tabelile 2  |
| XA2  | Mõõduka keemilise agressiivsusega keskkond                    | Betoon, mis on avatud looduslikule pinnasele ja pinnaveele vastavalt tabelile 2  |
| XA3  | Kõrge keemilise agressiivsusega keskkond                      | Betoon, mis on avatud looduslikule pinnasele ja pinnaveele vastavalt tabelile 2  |

Keemiliste mõjurite korral määrab keskkonnaklassi iga üksiku kemikaali puhul selle kõige ebasoodsam väärtus [Tabel 1.4]. Kui kaks või rohkem agressiivset karakteristikut viivad sama klassini, tuleb keskkond liigitada järgmisse kõrgemasse klassi, kui just selle konkreetse juhtumi spetsiaalne uurimus ei kinnita, et see ei ole vajalik [14].

Tabel 1.4 Keskkonnaklassidele vastavad looduslikus pinnases ja pinnasevees esinevate keemiliste mõjurite piirväärtused [14]

| Keemiline karakteristik   | Etalon-katsemeetod    | XA1                             | XA2                                 | XA3                         |
|---|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Pinnavesi</b>  |                       |                                 |                                     |                             |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l  | EN 196-2              | ≥ 200 ja ≤ 600                  | > 600 ja ≤ 3 000                    | > 3 000 ja ≤ 6 000          |
| pH  | ISO 4316              | ≤ 6,5 ja ≥ 5,5                  | < 5,5 ja ≥ 4,5                      | < 4,5 ja ≥ 4,0              |
| CO <sub>2</sub> mg/l<br>agressiivne   | EN 13577              | ≥ 15 ja ≤ 40                    | > 40 ja ≤ 100                       | > 100 kuni küllastumiseni   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l   | ISO 7150-1            | ≥ 15 ja ≤ 30                    | > 30 ja ≤ 60                        | > 60 ja ≤ 100               |
| Mg <sup>2+</sup> mg/l   | EN ISO 7980           | ≥ 300 ja ≤ 1 000                | > 1 000 ja ≤ 3 000                  | > 3 000 kuni küllastumiseni |
| <b>Pinnas</b>   |                       |                                 |                                     |                             |
| üldine SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>mg/kg <sup>a</sup>  | EN 196-2 <sup>b</sup> | ≥ 2 000 ja ≤ 3 000 <sup>c</sup> | > 3 000 <sup>c</sup> ja<br>≤ 12 000 | > 12 000 ja<br>≤ 24 000     |
| Baumann Gully<br>happelisus<br>ml/kg  | prEN 16502            | > 200                           | Praktikas ei esine                  |                             |
| <sup>a</sup> Savipinnase, mille filtratsioonimoodul on alla 10 <sup>-5</sup> m/s, võib paigutada madalamasse klassi.<br><sup>b</sup> Katsemeetod näeb ette SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ekstraheerimist soolhappe abil; võib kasutada ka vee ekstraheerimist, kui betooni kasutuskohas on vastav kogemus olemas.<br><sup>c</sup> Piirväärtus 3000 mg/kg vähendatakse 2000-le mg/kg, kui esineb sulfaatioonide betooni sissetungimise oht perioodilise kuivamise ja märgumise või kapillaarimavuse tõttu. |                       |                                 |                                     |                             |

Standardi EVS-EN 1992-1-1 lisa E määrab soovituslikud betooni tugevusklassid kestvuse tagamiseks eri keskkonnaklasside korral [Tabel 1.5].

Tabel 1.5 Orienteeruvad tugevusklassid [8]

| <b>Korrosioon</b>        |                               |                          |        |        |                         |     |        |                                 |        |     |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------|--------|-------------------------|-----|--------|---------------------------------|--------|-----|
|                          | Korrosioon karboniseerumisest |                          |        |        | Korrosioon kloriididest |     |        | Korrosioon merevee kloriididest |        |     |
|                          | XC1                           | XC2                      | XC3    | XC4    | XD1                     | XD2 | XD3    | XS1                             | XS2    | XS3 |
| Orienteeruv tugevusklass | C20/25                        | C25/30                   | C30/37 |        | C30/37                  |     | C35/45 | C30/37                          | C35/45 |     |
| <b>Betooni kahjustus</b> |                               |                          |        |        |                         |     |        |                                 |        |     |
|                          | Oht puudub                    | Külmumise/sulamise toime |        |        | Keemilised mõjurid      |     |        |                                 |        |     |
|                          | X0                            | XF1                      | XF2    | XF3    | XA1                     | XA2 | XA3    |                                 |        |     |
| Orienteeruv tugevusklass | C12/15                        | C30/37                   | C25/30 | C30/37 | C30/37                  |     | C35/45 |                                 |        |     |



Kasutades etteantud orienteeruvaid betooni tugevusklasse, on soovitatav konstruktsiooniklass S4, eeldades projekteeritud kasutusiga 50 aastat. Konstruktsiooniklassi saab modifitseerida kasutades tabelit 1.6. Sealjuures on minimaalne soovitatav konstruktsiooniklass S1.

Tabel 1.6 Soovitatav konstruktsiooniklassi modifitseerimine [8]

| Konstruktsiooniklass   |                                       |                                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Kriteerium   | Keskkonnaklass vastavalt tabelile 4.1 |                                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
|  | X0                                    | XC1                                 | XC2/<br>XC3                        | XC4                                | XD1                                | XD2/<br>XS1                        | XD3/<br>XS2/<br>XS3                |
| Pojekteeritud kasutusiga 100 aastat  | suurendada klassi 2 võrra             | suurendada klassi 2 võrra           | suurendada klassi 2 võrra          | suurendada klassi 2 võrra          | suurendada klassi 2 võrra          | suurendada klassi 2 võrra          | suurendada klassi 2 võrra          |
| Tugevusklass <sup>1) 2)</sup>  | ≥C30/37<br>vähendada klassi 1 võrra   | ≥C30/37<br>vähendada klassi 1 võrra | ≥35/45<br>vähendada klassi 1 võrra | ≥40/50<br>vähendada klassi 1 võrra | ≥40/50<br>vähendada klassi 1 võrra | ≥40/50<br>vähendada klassi 1 võrra | ≥45/55<br>vähendada klassi 1 võrra |
| Plaatelement (ehitusprotsess ei mõjuta armatuuri paiknemist)   | vähendada klassi 1 võrra              | vähendada klassi 1 võrra            | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           |
| Tagatud on betooni tootmise spetsiaalne kvaliteedikontroll   | vähendada klassi 1 võrra              | vähendada klassi 1 võrra            | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           | vähendada klassi 1 võrra           |
| <b>Märkused</b>  |                                       |                                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1. Tugev klassi ja vesi-tsementtegurit w/c vaadeldakse sõltuvate suurustena. Madala läbilaskvuse saamiseks võib kaaluda spetsiaalse koostise kasutamist (tsemendi liik, w/c suurus, filler). |                                       |                                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 2. Piiri võib vähendada ühe tugevusklassi võrra õhu manustamise korral enam kui 4 %.   |                                       |                                     |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |

## 1.5 Betooni kaitsekiht

Betooni kestvuse tagamisel on üheks olulisemaks teguriks betooni kaitsekiht, mis on kaugus betooni pinnale lähima armatuuri pinnast betooni lähima pinnani [8]. Konstruktsiooni elementidel tuleb määrata nimikaitsekiht  $c_{nom}$ , mis on defineeritud standardis EVS-EN 1992-1-1 kui minimaalse kaitsekihi ja kaitsekihi lubatava hälbe summana (valem 1.1). Minimaalne kaitsekiht peab tagama nakkejõudude kindla ülekandumise, piisava tulekindluse ning terase korrosioonikaitse.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \text{ (valem 1.1)}$$

kus  $c_{nom}$  – nimikaitsekiht, mm,

$c_{min}$  – minimaalne kaitsekiht, mm,

$\Delta c_{dev}$  – kaitsekihi lubatav hälve, mm.

Nõutavat minimaalset kaitsekihti tuleb suurendada lubatud negatiivse hälbe  $\Delta c_{dev}$  absoluutväärtuse võrra. Eesti rahvuslik lisa määrab soovituslikuks väärtuseks 10 mm, mida võib betooni tootmisel kvaliteedikontrolli monitoorimisega vähendada [8].

Standard määratleb mitmeid erinevaid ohutusest või armatuurterase valikust sõltuvaid minimaalseid kaitsekihte ning projekteerimisel tuleks nendest arvestada suurimat. Konstruktsiooni kestvuse seisukohast on neist olulisim  $c_{min,dur}$ , mis on keskkonna- ja konstruktsiooniklassi arvesse võttev normaalbetoonis paikneva armatuuri ja pingearmatuuri minimaalne kaitsekiht [8].

Betooni minimaalne kaitsekiht määratakse konstruktsiooniklassi (S1–S6) ja keskkonnaklassi (X0, XC, XD, XA, XF, XS) kaudu. Modifitseeritud konstruktsiooniklassi ja keskkonnaklassi järgi saab tabeli 1.7 abil leida minimaalse kaitsekihi väärtused  $c_{min,dur}$ .

Tabel 1.7 Armatuurterase kestvusest tulenevad minimaalse kaitsekihi  $c_{min,dur}$  väärtused vastavalt standardile EN 10080 [8]

| Keskkonnanõuded kaitsekihile $c_{min,dur}$ (mm) |                                       |     |         |     |         |         |         |
|---|---------------------------------------|-----|---------|-----|---------|---------|---------|
| Konstruktsiooniklass                            | Keskkonnaklass vastavalt tabelile 4.1 |     |         |     |         |         |         |
|   | X0                                    | XC1 | XC2/XC3 | XC4 | XD1/XS1 | XD2/XS2 | XD3/XS3 |
| S1  | 10                                    | 10  | 10      | 15  | 20      | 25      | 30      |
| S2  | 10                                    | 10  | 15      | 20  | 25      | 30      | 35      |
| S3  | 10                                    | 10  | 20      | 25  | 30      | 35      | 40      |
| S4  | 10                                    | 15  | 25      | 30  | 35      | 40      | 45      |
| S5  | 15                                    | 20  | 30      | 35  | 40      | 45      | 50      |
| S6  | 20                                    | 25  | 35      | 40  | 45      | 50      | 55      |

Kõige väiksem minimaalne kaitsekiht  $c_{min,dur}$ , mida on lubatud kasutada väga kuivas keskkonnas või juhul, kui betoonkonstruktsioon ei sisalda armatuuri (keskkonnaklass X0) on konstruktsiooniklassi S1 – S4 korral 10 mm. Suurim minimaalne kaitsekiht keskkonnaklasside XD3/XS3 ja konstruktsiooniklassi S6 korral on 55 mm.

Eestis saab sildade ja rajatiste puhul enamasti määravaks keskkonnaklass XD (kloriididest põhjustatud korrosioon). Eesti riigimaanteedele ja kohalikele omavalitsustele kuuluvatele teedele teostatakse talvisel ajal libedusetõrjet, milleks kasutatakse tavapäraselt NaCl (naatriumkloriid) segu. Tõrjet teostatakse veoautodele paigaldatavate soolapuisturitega, mis paratamatult paiskavad soolasegu ka otse rajatiste

betonpindadele. Lõrtsiste ilmade ja kevadiste suladega juhib sulavesi soolaseguse vee läbi teekonstruktsiooni muldesse, kus see satub kokkupuutesse rajatiste maaaluste pindadega.

## **1.6 Betoonkonstruktsioonide projekteerimine kehtivate standardite järgi**

Eurokoodeksi järgselt peaks betoonkonstruktsiooni projekteerimist alustama konstruktsiooni kasutusea määramisest. Betooni reaalne kasutusiga sõltub suuresti konstruktsiooni projekteerimisel kasutusele võetud meetmetest, millega kavandatud kestvust tagada, kuid ka betooni enda omadustest. Standardi EVS-EN 206:2014+A1:2016 lisa F „Soovitused betooni koostise piirväärtuste valikuks“ esitatud väärtuste [Tabel 1.8] eelduseks on, et kavandatud kasutusiga on vähemalt 50 aastat [14].

Tabelis 1.8 esitatud väärtused kehtivad standardi EVS-EN 197-1 kohastele harilikele tsementidele, mille puhul kasutussobivus kõnealuse keskkonnaklassi tingimustes on kindlaks määratud kasutuskohas kehtivates eeskirjades ning normaaltihedusega täitematerjalidele, mille  $D_{max}$  on piirides 20 mm kuni 32 mm [14].

Standardi kohaselt on tabelis 1.2 esitatud minimaalsed tugevusklassid tuletatud vesitsementteguri ( $w/c$ ) ja betooni tugevusklassi vahelisest sõltuvusest. Maksimaalse vesitsementteguri ja minimaalse tsemendisalduse piirväärtused rakenduvad kõigil juhtudel, täiendavalt võivad olla spetsifitseeritud nõuded betooni tugevusklassile [14]. Betooni koostise piirväärtused, maksimaalne vesitsementtegur, minimaalne tsemendi kogus ning minimaalne betooni klass on soovitatud vastavuses keskkonnaklassidega (kasutades CEM I ja projekteeritud kasutusiga 50 aastat).

Tabel 1.8 Betooni koostise ja omaduste soovitatavad piirväärtused [14]

| Keskonnaklass   |  |        |        |        |        |  |        |        |                          |        |  |                  |                                   |                  |  |        |        |
|---|--|--------|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------------------------|--------|--|------------------|-----------------------------------|------------------|--|--------|--------|
| Korro-<br>siooni-<br>oht<br>puu-<br>dub                           | Karboniseerumisest tulenev<br>korrosioonioht |        |        |        |        | Kloriididest tulenev korrosioonioht          |        |        | Külmumise/sulamise mõjur |        |  |                  | Agressiivne keemiline<br>keskkond |                  |  |        |        |
|   | Merevesi                                     |        |        |        |        | Muud kloriidid (mis ei<br>päriine mereveest) |        |        | XF 1                     | XF 2   | XF 3   | XF 4             | XA 1                              | XA 2             | XA 3                                   |        |        |
|   | XC 1   | XC 2   | XC 3   | XC 4   | XS 1   | XS 2   | XS 3   | XD 1   | XD 2                     | XD 3   | XF 1   | XF 2             | XF 3                              | XF 4             | XA 1                                   | XA 2   | XA 3   |
| Max w/c <sup>a</sup>  | -  | 0,65   | 0,60   | 0,55   | 0,50   | 0,45   | 0,45   | 0,55   | 0,55                     | 0,45   | 0,55   | 0,55             | 0,50                              | 0,45             | 0,55                                   | 0,50   | 0,45   |
| Min<br>tugevus-<br>klass  | C12/15                                       | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C30/37 | C35/45                                       | C35/45 | C30/37 | C30/37                   | C35/45 | C30/37   | C25/30           | C30/37                            | C30/37           | C30/37                                 | C30/37 | C35/45 |
| Min<br>tsemendi-<br>sisaldus <sup>b</sup><br>(kg/m <sup>3</sup> ) | -  | 260    | 280    | 280    | 300    | 320  | 340    | 300    | 300                      | 320    | 300  | 300              | 320                               | 340              | 300                                    | 320    | 360    |
| Min õhu-<br>sisaldus<br>(%)                                       | -  | -      | -      | -      | -      | -  | -      | -      | -                        | -      | -  | 4,0 <sup>a</sup> | 4,0 <sup>a</sup>                  | 4,0 <sup>a</sup> | -                                      | -      | -      |
| Muud<br>nõuded  | -  | -      | -      | -      | -      | -  | -      | -      | -                        | -      | Piisava külmumis/sulamis-<br>kindlusega standardile<br>EN 12620 vastav täitematerjal |                  |                                   | -                | Sulfaadikindel<br>tsement <sup>b</sup> |        |        |

<sup>a</sup> Kui õhku ei manustata, tuleks betooni toimivust katsetada, kasutades sobivat katsemeetodit, ja võrrelda betooniga, mille külmakindlus antud keskonnaklassi puhul on kontrollitud.

<sup>b</sup> Kui keskkonna sulfaadisisaldus viib keskonnaklassideni XA2 ja XA3, siis on oluline kasutada sulfaadikindlaid tsemente, mis vastavad standardile EN 197-1 või vastavatele täiendatud rahvuslikele standarditele.

<sup>c</sup> k-väärtuse kontseptsiooni rakendamisel muudetakse vesi-tsementtegurit ja tsemendisaldust vastavalt jaotisele 5.2.5.2.

Kui betoon vastab piirväärtustele, siis rahuldab konstruktsioonibetoon ettenähtud kasutuse korral spetsifitseeritud tingimustes esitatavaid kestvusnõudeid, eeldusel, et [14]:

- valitud on asjakohased keskkonnaklassid;
- sarrusel on minimaalne betoonkaitsekiht, mis vastab toimivate keskkonnatingimuste korral asjakohase projekteerimisstandardi, nt standardi EVS-EN 1992-1-1 nõuetele;
- betoon on korralikult paigaldatud, tihendatud ja hooldatud, nt. vastavalt standardile EVS-EN 13670 või mõnele teisele asjakohasele standardile;
- betooni hooldatakse asjakohaselt kogu tööea jooksul.

Projekteerimisfaasis on võimalik antud eeldustest rakendada ainult sobivate keskkonnaklasside ja minimaalse betoonikaitsekihi korrektset valikut.

## 1.7 Kehtivate standardite puudused

Eurokoodeksi ettekirjutavad (*prescriptive*) spetsifikatsioonid on konstruktsiooni keskkonnatingimuste osas ebaselged, sest põhinevad varasema perioodi andemetel, kui ehitusmaterjalid ei olnud keerukad ja kestvus ei olnud nii kriitiline küsimus, kui see on tänapäeval. Standard täpsustab parameetreid, mis on praktikas sageli kontrollimatud, eriti juba väljaehitatud konstruktsioonide osas, ning seega ei saa neid objektiivselt hinnata [15].

Euroopas on betoonsildade kestvuse projekteerimiseks ja betooni spetsifitseerimiseks kasutusel standardid EVS-EN 1992, Eurocode 2, Osa 1 (EVS-EN 1992-1-1, 2004) ja 2 (EVS-EN 1992-2, 2005) ja EVS-EN 206 (2013). Need standardid eeldavad, et kui konstruktsioon on ehitatud vastavalt standardi EVS-EN 13670 eeskirjadele, on selle kasutusiga 50 aastat [16]. Standardites esitatud nõuded ja piirväärtused ei võta aga arvesse olukorda, kui konstruktsiooni kavandatud eluiga on sellest lühem või pikem (sildade ja muude ehitustehniliste rajatiste puhul standardi EVS-EN 1990:2002 kohaselt indikatiivne projekteeritud kasutusiga 100 aastat [7]).

Standardi EVS-EN 1992-1-1 lisa E kõrvutab betooni tugevusklassid ja keskkonnaklassid, mis eeldab raskemate keskkonnatingimuste korral tugevamat betooni ja sellest tulenevalt kestvamat konstruktsiooni. Kuigi suure survetugevuse klassiga betoon on enamasti vastupidavam kui madalama tugevusklassiga betoon, ei ole survetugevus ise betooni

kestvuse määramiseks sobilik mõõde. Seda põhjusel, et kestvus sõltub peamiselt betooni pinnakihtide omadustest, millel on betooni survetugevusele piiratud mõju [17]. Suurendades betooni survetugevust tsemendi koguse suurendamise kaudu võib tagajärjeks saada segu, mis on vastuvõtlikum pragunemisele ja mis omakorda mõjutab betooni kestvust negatiivselt. Samuti mõjutab betooni kestvust kasutatud tsemendi tüüp, terasuurus ja kasutatud tsemendilisandid [18]. Tavapraktikas mõõdetakse pärast betooni segamist ja paigaldamist ainult survetugevust, et tagada vastavus projekteerimisnõuetele ja spetsifikatsioonidele. Selleks kasutatakse spetsiaalselt valmistatud katsekehasid, mis on kivinenud ja katsetatud tingimustes, mis on tegeliku konstruktsiooniga võrreldes erinevad [15].

Standardi EVS-EN 206:2014+A1:2016 lisa F määrab eri keskkonnaklasside korral maksimaalse vesitsementtegur  $w/c$  ja minimaalse tsemendisalduse piirväärtused. Vesitsementtegur ei ole betooni puhul hea kestvuse näidik. Betooni vastupidavus sõltub suurel määral materjali resistentsusest agressiivsete ainete läbitungimisele erinevate mehhanismide (peamiselt läbilaskvuse ja difusiooni) abil. Seda takistust reguleerib peamiselt betoonkonstruktsiooni pooride struktuur, eriti tsemendipasta ja agregaatide ümber asuva üleminekutsooni struktuur. Betooni koostisele piirangute kehtestamine (eriti selle vesitsementtegurile) kujutab endast katset reguleerida betoonisüsteemi pooride struktuuri. Kuid see lähenemine eeldab, et kõik materjalid (eriti tsemendid) toimivad ühtmoodi; st. kõik samasuguse  $w/c$  suhtega betoonid toimivad samamoodi, sõltumata tsemendi (ja teiste asjaomaste koostisosade) omadustest. Samasuguste betooni koostisosade puhul on tõsi, et suurem  $w/c$  suhe tähendab betooni suuremat läbitungitavust. Teisalt, sama vesitsementteguri suhte puhul varieerub betooni läbitavus oluliselt sõltuvalt kasutatava tsemendi tüübist ja omadustest [16].

Vesitsementteguri teiseks nõrkuseks on selle kontrollimise võimatus. Hetkel ei ole standardiseeritud ega kasutusele võetud ühtegi testmeetodit, et katseliselt määrata vesitsementtegur värskelt ehitatud betoonil. Tegur määratakse tootja poolt tehases ning eeldatakse selle õigsust. Erinevad katsed aga näitavad olukordi, kus tegur on vale, sest betooni koostisosade niiskust on valesti arvestatud või on betooni transportimisel omaalgatuslikult lisatud segule juurde vett [16].

Betooni kaitsekihi paksus on terase korrosioonikaitse seisukohast väga oluline. Eurokoodi standardites on esitatud 50-aastasele kasutuseale projekteerides minimaalne kaitsekiht, mis on erinevate Euroopa riikide spetsialistide ekspertarvamuste tulemus. Projekteerides 50-aastase kasutusea asemel 100-aastale, tuleb praeguse standardi kohaselt lisada minimaalse kaitsekihi väärtusele 10 mm. Kaitsekihtide suhe on esitatud tabelis 1.9.

Kasutades Fick'si teise difusiooniseaduse valemeid (mis arvestavad karboniseerumise, kloriidide ja vee läbitungimise edenemist aja jooksul betoonis), selgub, et 50 ja 100 aastase kasutusea puhul peaks kaitsekihtide vahe olema 1,41 kuni 1,73 kordne. Standardkohaste minimaalsete kaitsekihtide korral jäävad enamik neist ohtlikule poolele, nagu selgub artiklist [16].

Tabel 1.9 Betooni kaitsekihid sõltuvalt keskkonnaklassist ja kasutuseast [16] (Autori poolt kohandatud)

| Betooni kaitsekiht | Kasutusiga  | XC1  | XC2  | XC3  | XC4  | XD1  | XD2  | XD3  |
|--------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $C_{min,dur}$      | 50 aastat   | 15   | 25   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   |
|                    | 100 aastat  | 25   | 35   | 35   | 40   | 45   | 50   | 55   |
|                    | 100/50 suhe | 1,67 | 1,40 | 1,40 | 1,33 | 1,29 | 1,25 | 1,22 |

## **2 TOIMIVUSPÕHISED MUDELID KESTVUSE HINDAMISEKS**

Raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse parendamiseks on oluline nõuda, et ehitatud konstruktsioonid vastaksid teatavatele kriitilistele toimimise kriteeriumitele tõenäoliste halvenemisviiside, eelkõige terase korrosiooni osas. Eesmärk on tagada, et struktuur ei läheneks selle kasutusea jooksul piiriseisundile, mille ületamisel on ehitise kasutuskõlblikkust ohustatud. Tulemuspõhiste spetsifikatsioonide eesmärk on tagada, et saavutatakse vastuvõetav kestvuse tõenäosus. Üleminek ettekirjutavatelt toimivuspõhiste spetsifikatsioonidele on üks olulisi samme, mis on vajalikud praegustel raudbetoonkonstruktsioonidel sageli ilmnunud puuduste kõrvaldamiseks [15].

Insenerid vajavad vahendeid raudbetoonkonstruktsioonide kasutusea jooksul nende seisukorra halvenemise modelleerimiseks või prognoosimiseks. "Kasutusea modelleerimine" (*Service Life Modelling, SLM*) eesmärk on võimaldada struktuuride projekteeritud kasutusaja kvantifitseerimist majandusliku optimeerimise, kasutustõhususe ning püsiva struktuurilise ja esteetilise toimimise eesmärgil. Seetõttu on "kasutusea modelleerimine" ja "kasutusea projekteerimine" tihedalt seotud: ratsionaalne projekteerimine vajab häid mudeleid, mudelid annavad sisendi projekteerimiseks [15].

### **2.1 Pärnu kesklinna sild**

Toimivuspõhiste mudelite katsetamiseks on aluseks võetud Selektor Projekt OÜ poolt koostatud projekt „P19050 Pärnu kesklinna silla laiendamine ja rekonstrueerimine“. Rajatise kandevkonstruktsioonide projekteeritud (1956. aastal) eluiga on 100 aastat, millest ekspluatatsioonile on kulunud 65 aastat ning rekonstrueerimise eesmärk on tagada silla ohutu ekspluateerimine järgnevak 50 aastaks [35].





Joonis 2.1 Pärnu kesklinna sild [35]

Pärnu kesklinna silla laiendamise ja rekonstrueerimise projektlahendus on jagatud ajaliselt ning mahult kaheks töö etapiks:

- Kiireloomulised säilitusremonttööd, perspektiiviga 5 aastat
- Põhjalikud renoveerimistööd, sh. silla laiendamine, kasutuseaga 50 aastat

Renoveerimistöode kohta on koostatud renoveerimisprojekt, mis hõlmab endas lisaks teistele vajalikele renoveerimistöodele ka olemasoleva tekiplaadi lammutamist ja uue laiendatud monoliitse raudbetoon tekiplaadi ehitamist. Tekiplaat rajatakse ühtlase ristlõikega monoliitselt vastavalt kattealusele projektkõrgusele [35].

Toimivuspõhiste mudelite lähteandmete leidmiseks on kasutatud eelkirjeldatud projekti uue tekiplaadi ehitamise osa ning Pärnu regiooni ilmajaamade lähteandmeid. Mudelite tulemused põhinevad kirjandusest leitavate tegurite keskväärtustel, standardhälbeid ja beeta jaotuste alumised/ülemised piirid on toodud informatsiooniks ja käesolevas töös neid ei kasutata.

## 2.2 Karboniseerumisest põhjustatud korrosioon

Praeguse hetkeni ei ole veel ühtegi rahvusvahelist tunnustust leidvat mudelit, määramaks korrosiooniperioodi pikkust kuni betooni pragunemiseni, killustumiseni või konstruktsiooni kokkukukkumiseni. Seetõttu kasutatakse kasutusea projekteerimisel tavaliselt piirseisundina depassivatsiooni (kui pH armatuuri pinnal on langenud väärtuseni 8-9), mis esineb vaid juhul, kui on piisavalt suur õhuniiskus terase korrosiooni toimumiseks. Selle piirseisundi ületamisel on tagajärjeks tulevaste kaitse- ja remonditööde suurem maksumus. [19].

Täistõenäosuslik projekteerimismeetod karboniseerumisest tingitud korrosioonile – pragunemata betoon:

$$x_c(t_{SL}) = \sqrt{2 * k_e * k_c * R_{NAC,0}^{-1} * C_S * \sqrt{t} * W(t)} \text{ (valem 2.1) [20]}$$

kus  $x_c(t_{SL})$  – karboniseerumissügavus ajahetkel  $t_{SL}$ , mm,

$t$  – aeg, aastat,

$k_e$  – keskkonnategur,

$k_c$  – ülekandetegur,

$C_S$  – CO<sub>2</sub> kontsentratsioon õhus, kg/m<sup>3</sup>,

$W(t)$  – ilmategur,

$R_{NAC,0}^{-1}$  – betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus, (mm<sup>2</sup>/aastas)/(kg/m<sup>3</sup>).

### 2.2.1 Projekteeritud eluiga $t_{SL}$

Sarnaselt hetkel kasutusel olevale standardile EVS-EN 1990:2002, määrab ka FIB34 indikatiivsed väärtused [Tabel 2.1] erinevate konstruktsioonide projekteeritava eluea valimiseks. Sildade puhul on sarnaselt hetkel kasutusel olevate Eurokoodeksi standarditega soovitatud kasutada projekteeritud eluiga 100 aastat. Sama pikkusega perioodi rakendatakse ka monumentaalsete ehitiste ja muude tsiviilehitiste puhul.

Tabel 2.1 Indikatiivsed väärtused projekteeritud eluea  $t_{SL}$  määramiseks [20]

| Projekteeritud eluiga $t_{SL}$ , aastat | Näited  |
|---|---|
| 10                                      | Ajutised konstruktsioonid                               |
| 10-25                                   | Vahetatavad osad  |
| 15-30                                   | Põllumajanduslikud ja muud sarnased konstruktsioonid    |
| 50                                      | Hoonete konstruktsioonid                                |
| 100                                     | Monumentaalsed ehitised, sillad ja muud tsiviilehitised |

Konstruktsiooni kasutusea määramine on rajatise omaniku ülesanne. Pärnu kesklinna silla näitel on eelnevalt sild ekspluateeritud 65 aastat ning rekonstrueerimise eesmärk on tagada silla ohutu ekspluateerimine veel järgnevaks 50 aastaks. Mudelite katsetamisel arvestatakse projekteeritud kasutusiga 50 ja 100 aastat.

### 2.2.2 Betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus $R_{ACC,0^{-1}}$

Betooni karbonisatsioonikindlus määratakse kiirendatud karbonisatsioonikatsetega (ACC katse), kus laboris ettevalmistatud betooniproove katsetatakse kokkulepitud tingimustel ( $20^{\circ}\text{C}$  ja  $RH = 65\%$ ) ajahetkel  $t_0$  (referentsaeg  $t_0 = 0,0767$  aastat ehk 28 päeva).

$$R_{ACC,0^{-1}} = \left(\frac{x_c}{\tau}\right)^2 \text{ (valem 2.2) [20]}$$

kus  $R_{ACC,0^{-1}}$  – betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus,  $(\text{mm}^2/\text{aastas})/(\text{kg}/\text{m}^3)$ ,  
 $x_c$  – mõõdetud karbonisatsioonisügavus, meetrit,  
 $\tau$  – ajakonstant,  $(\text{s}/\text{kg}/\text{m}^3)^{0,5}$ .

Juhtudel, kus katseandmed ei ole saadaval, soovitab FIB34 kasutada väärtusi kirjandusest  $R_{ACC,0^{-1}}$  väärtuse määramiseks [20]. Juhendi soovitatud väärtused on kajastatud tabelis 2.2.

Tabel 2.2  $R_{ACC,0^{-1}}$  määramine vastavalt tsemendi tüübile ja vesitsementtegurile [20]

| $R_{ACC,0^{-1}}$          | $w/c$ (eqv) <sup>1</sup> |      |           |           |       |           |
|---------------------------|--------------------------|------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Tsemendi tüüp             | 0,35                     | 0,40 | 0,45      | 0,50      | 0,55  | 0,60      |
| CEM I 42,5 R              | määramata                | 978  | 1640      | 2144      | 3091  | 4226      |
| CEM I 42,5 R + FA (k=0,5) | määramata                | 95   | 599       | 757       | 2050  | 2617      |
| CEM I 42,5 R + SF (k=2,0) | 1104                     | 1734 | määramata | määramata | 5203  | määramata |
| CEM III/B 42,5            | määramata                | 2617 | 5330      | 8389      | 13970 | 25229     |

\* Tabeli väärtused ühikuga (mm<sup>2</sup>/aastas)/(kg/m<sup>3</sup>)

<sup>1</sup> Vesitsementtegur, võttes arvesse FA (lendtuhk) või SF (peenräni) sisaldust nendele vastava kateguri väärtusega (kasutegur); FA sisaldus 22 %/tsemendi massist, SF sisaldus 5 %/tsemendi massist

Pakutav andmete hulk on suhteliselt väike, sest väärtused on määratud ainult nelja erineva betoonisegu ja kuue erineva vesitsementteguri puhul (määratud 18 väärtust maksimaalsest 24-st). Antud segud ei kajasta kõiki sihtkohas tihedalt kasutatavaid segusid ning kaheldav on ka katseväärtuse usaldatavus, sest pole teada läbiviidud katsete arv, katsetatud labori info või tõendid katsetajate kompetentsi kohta selle katse läbiviimisel [21].

Karbonisatsioonikindluse pöördväärtus määrab betooni kvaliteedi, võttes arvesse selle transpordi karakteristikuid ja läbilaskvust (CO<sub>2</sub> difusioonikoefitsienti), mis sõltub tsemendi tüübist ja vesitsementtegurist. Seega on läbi selle parameetri võimalik saavutada otsene mõju betooni kaitsekihile, eelkõige sobiva tsemenditüübi valikuga. Erinevad uuringud näitavad, et sõltuvalt valitud tsemendisegust erineb  $R_{ACC,0}^{-1}$  väärtus suurel määral. Vastakaid arvamusi ilmneb ka erinevaid tsemendilisandite (lendtuhk, peenräni, kõrgahju räbu jne) mõju kohta  $R_{ACC,0}^{-1}$  väärtusele. Seetõttu on soovituslik läbi viia erinevate kirjandusallikate üksikasjalik analüüs ja korraldada eksperimentaalsed katsetused, et tagada karbonisatsioonikindluse pöördväärtuse õige väärtus [21].

Enne mudeli kasutuselevõttu Eesti tingimustes, on vajalik enim kasutatavaid betoonseguisid antud teguri täpsustamiseks katsetada. Betooni karboniseerumiskiiruse määramiseks normaaltingimustel on Eestis kasutusel standard EVS-EN 12390-10:2018 [36]. Rahvusvaheliselt on kasutusel ka kiirendatud meetodil betooni karboniseerumiskindluse katse, mida kirjeldab standard ISO 1920-12:2015 [37].

### 2.2.3 Betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus $R_{NAC,0}^{-1}$

Betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus leitakse kasutades kiirendatud karbonisatsioonikatset (ACC katse).

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t * R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \text{ (valem 2.3) [20]}$$

kus  $R_{ACC,0}^{-1}$  – betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus kiirendatud (ACC) katse korral, (mm<sup>2</sup>/aastas)/(kg/m<sup>3</sup>),

$R_{NAC,0^{-1}}$  – betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus normaaltingimustes (NAC) katse korral,  $(\text{mm}^2/\text{aastas})/(\text{kg}/\text{m}^3)$ ,  
 $k_t$  – kiirendatud (ACC) katse regressiooniparameeter (testmeetodi mõju),  
 $\varepsilon_t$  – veatingimus ebatäpsuste puhul,  $(\text{mm}^2/\text{aastas})/(\text{kg}/\text{m}^3)$ .

Tegurid  $k_t$  ja  $\varepsilon_t$  on võetud kasutusele, et kiirendatud ACC katse korral leitud betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtust teisendada valemis kasutusel olevaks  $R_{NAC,0^{-1}}$ , mis iseloomustab sama näitajat normaaltingimustes (NAC) teostatud katse korral. Tegurid võtavad arvesse testmeetodide erinevuste ja muude ebatäpsuste mõju [20].

#### 2.2.4 Keskkonnategur $k_e$

Kui CO<sub>2</sub> lahustamiseks ei ole piisavalt vajalikku vett siis betooni karboniseerumist ei toimu. Karboniseerumise võib tähelepanuta jätta ka veega küllastunud betoonis, sest CO<sub>2</sub> difusioon on vees umbes 10<sup>4</sup> korda aeglasem kui õhus. Kõrgeim karboniseerumiskiirus betoonis esineb 50 % - 70 % suhtelise õhuniiskuse juures [22].

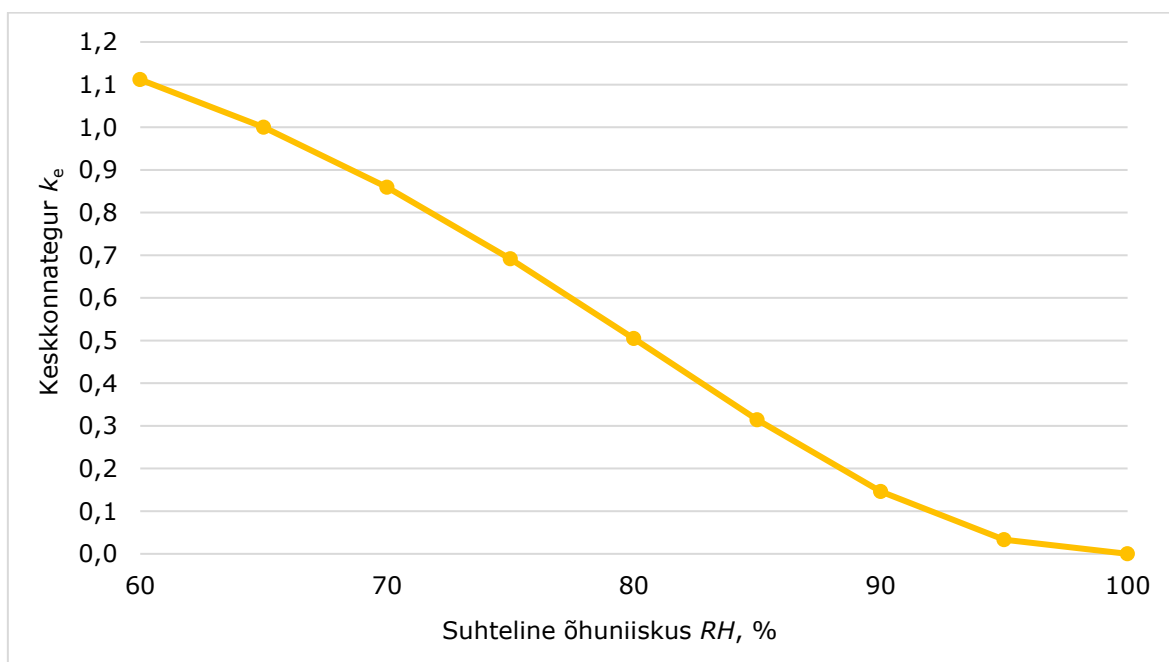
Tegureid  $k_e$  ja  $W(t)$  kasutatakse suhtelise õhuniiskuse ja märgumisastme mõju kirjeldamiseks. Tegur  $k_e$  kirjeldab suhtelise õhuniiskuse ( $RH_{\text{real}}$ ) mõju karboniseerumisele;  $k_e = 1$ , kui välisõhu suhteline õhuniiskus on võrdne referents õhuniiskusega laboritingimustes (ACC katse korral)  $RH_{\text{ref}} = 65 \%$ ,  $k_e > 1$  kui  $RH_{\text{real}} < 65 \%$  ja  $k_e < 1$  kui  $RH_{\text{real}} > 65 \%$ . Seega ülehindab  $k_e$  karboniseerumise määrasid madala õhuniiskuse juures, eriti alla 50 %. Tegur  $k_e$  ei sõltu ajast, seega eeldab pidevat karboniseerimisprotsessi ja seetõttu ignoreerib betooni koostise (poorsus, pooride suuruse jaotus) mõju suure suhtelise õhuniiskuse korral [22].

Valem võtab arvesse õhuniiskuse mõju difusioonikoefitsendile ja seeläbi betooni vastupanule karboniseerumise suhtes. Referents kliima on  $T = +20^\circ\text{C} / RH = 65 \%$ .

$$k_e = \left( \frac{1 - \left(\frac{RH_{\text{real}}}{100}\right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{\text{ref}}}{100}\right)^{f_e}} \right)^{g_e} \text{ (valem 2.4) [20]}$$

kus  $RH_{\text{real}}$  – karboniseerunud pinna suhteline õhuniiskus, %,  
 $RH_{\text{ref}}$  – referents suhteline õhuniiskus, %,  
 $f_e$  – eksponent,  
 $g_e$  – eksponent.

Karboniseerunud pinna suhteline õhuniiskuse asemel soovitab FIB34 kasutada ümbritseva keskkonna suhtelist õhuniiskust, kuna teguri  $RH_{real}$  väärtuse täpne leidmine betooni pinnal on raske [20]. Edaspidi kasutatakse töös  $RH_{real}$  asemel tähist  $RH$ .



Joonis 2.2 Keskkonnategur  $k_e$  erinevate suhtelise õhuniiskuste  $RH$  korral (vahemikus 60-100 %)

Joonisel 2.2 on näha keskkonnateguri  $k_e$  väärtus erinevate suhteliste õhuniiskuste korral, kui  $RH$  on vahemikus 60% - 100 %. Teguri väärtus muutub vahemikus 0 kuni 1,1, olles kõige suurem suhtelise õhuniiskuse 60 % korral ja väikseim õhuniiskuse 100 % korral.

Toimivusmudelite katsetamiseks vajalikud meteoroloogilised andmed on saadud Eesti Riigi Ilmateenistuse avalikust andmebaasist [23]. Kasutatud andmed on Pärnu rannikujaama automatiseeritud vaatluspunktist, mis asub Pärnu kesklinna sillast alla 1 km kaugusel. Seega võib antud jaama andmeid pidada antud konstruktsiooni keskkonna hindamiseks väga täpseteks.

Riigi ilmateenistuse andmetel, on Pärnu rannikujaamas mõõdetud väikseim keskmine suhteline õhuniiskus perioodil 1991 - 2020 maikuu ( $RH = 68\%$ ) ja suurim novembris-detsembris ( $RH = 89\%$ ). Aasta lõikes keskmine suhteline õhuniiskus on  $RH = 81\%$ , mida edaspidi kasutatakse käesolevas töös konstruktsiooni ümbritseva keskkonna suhtelise õhuniiskusena  $RH$ . Kasutades valemit 2.4 saadi keskkonnateguri  $k_e$  väärtuseks 0,466.

Tabel 2.3 Pärnu rannikujaama suhteline õhuniiskus [23] (Autori poolt kohandatud)

| Suhteline õhuniiskus (%) perioodil 1991-2020 |    |    |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     |       |
|--|----|----|-----|----|----|----|-----|------|----|----|----|-----|-------|
|  | I  | II | III | IV | V  | VI | VII | VIII | IX | X  | XI | XII | Aasta |
| Pärnu  | 88 | 87 | 81  | 73 | 68 | 73 | 75  | 78   | 82 | 86 | 89 | 89  | 81    |

Tabelis 2.4 toodud suhtelise õhuniiskuse  $RH$  ja tegurite  $ToW$  ning  $p_{SR}$  väärtuste järgi saab määrata keskkonnaklassi, mille alla antud betoonkonstruktsioon liigitub. Erinevalt hetkel kehtivale EVS-EN 206 standardile, mille alusel saab konstruktsioone keskkonnaklassidesse liigitada, seob järgnev tabel keskkonnaklassid ära konkreetsete suhtelise õhuniiskuse näitajatega, mis lihtsustab oluliselt klassi määramist.

Tabel 2.4 Suhteline õhuniiskus  $RH$  ja selle jaotus sõltuvalt keskkonnaklassist, märjast ajast  $ToW$  (*time of wetness*) ja hoovihma tõenäosusest  $p_{SR}$  Euroopa kliimas [24] (Autori poolt kohandatud)

| Keskkonna klass | Keskkonna kirjeldus                   | $RH, \%$ |                        |                          | $ToW$                   | $p_{SR}$                |
|-----------------|---------------------------------------|----------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                 |                                       | Jaotus   | Keskvärtus, $\mu$      | Standard hälve, $\sigma$ | Konstant                | Konstant                |
| XC1             | kuiv, siseruumides                    | konstant | $50 \leq \mu \leq 70$  | -                        | -                       | -                       |
|                 | püsivalt märg, vee all                |          | $\mu = 100$            | -                        | 1                       | -                       |
| XC2             | märg, harva kuiv                      | konstant | $90 \leq \mu \leq 100$ | -                        | $0 \leq \mu \leq 0,80$  | -                       |
| XC3             | mõõdukalt niiske, vihma eest kaitstud | Weibull  | $75 \leq \mu \leq 85$  | $8 \leq \mu \leq 12$     | -                       | -                       |
| XC4             | vaheldumisi märg ja kuiv              | Weibull  | $75 \leq \mu \leq 85$  | $8 \leq \mu \leq 12$     | $0,2 \leq \mu \leq 0,3$ | $0,1 \leq \mu \leq 0,6$ |

Aasta keskmise suhtelise õhuniiskuse 81 % juures tuleb tabeli 2.3 järgi Pärnu kesklinna silla tekiplaat määrata keskkonnaklassi XC3 või XC4. Võttes arvesse, et silla tekiplaat pealispind kaetakse hüdroisolatsiooniga, kaitsebetooni ja kahekihilise asfaltbetooniga, loetakse betoon otsese vihma eest kaitstuks. Standard EVS-EN 1992-2:2005 ptk 4.2 punkt 105 lubab hüdroisolatsiooniga kaetud pindade korral võtta keskkonnaklassiks XC3, kui rahvuslik lisa seda lubab [34]. Pärnu kesklinna silla rekonstrueerimise projektis on eeltoodud eeldustel arvestatud keskkonnaklassiga XC3. Käesolevas töös rakendatakse tekiplaadile lisaks keskkonnaklassi XC4, mis võimaldab näidata tegurite  $ToW$  ja  $p_{SR}$  mõju karboniseerumissügavusele .

### 2.2.5 Ülekandetegur $k_c$

Tegur võtab arvesse betooni järelhoolduse mõju betooni vastupanule karboniseerumise suhtes. Järelhooldus sisaldab endas kõiki meetmeid, mis on suunatud betooni pinnakihtide varajase kuivamise vältimisele [20]. See kaitseb betooni pinnakihte kuivamise eest ja seeläbi mõjutab nende kihtide kestvust. Hoolduse aja ja selle kvaliteedi kasvades väheneb karboniseerumiskiirus eksponentsiaalselt. Üldiselt on järelhoolduse mõju karboniseerumissügavuse absoluutsele vähenemisele suurem madalama karboniseerumiskindlusega betoonide puhul [22].

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c} \text{ (valem 2.5) [20]}$$

kus  $t_c$  – järelhoolduse aeg, päeva,  
 $b_c$  – regresiooni eksponent.

Eestis tuleks ehitusel kohaldada EVS-EN 13670:2010 järgset järelhoolduse pikkust. Standard jagab betooni hoolduse nelja klassi, mis määratletakse hooldusperioodi kestuse või protsentuaalse tugevusega 28-päevasest normsurvetugevusest. Hooldusklassi valik oleneb keskkonnaklassist, betooni koostise valikust ja armatuuri kaitsekihi valikust. Olenevalt hooldusklassi valikust varieerub minimaalse hooldusperioodi pikkus 1 päevast kuni 30 päevani [25].

### 2.2.6 Keskkonnamõju $C_s$ (CO<sub>2</sub> kontsentratsioon)

CO<sub>2</sub> kontsentratsioon kujutab endas keskkonna otsest mõju raudbetoonkonstruktsioonile ja on seega karboniseerumisprotsessi põhiline käivitaja. Protsess kiireneb CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni suurenemisel konstruktsiooni ümber [21].

$$C_s = C_{s,atm} + C_{s,emi} \text{ (valem 2.6) [20]}$$

kus  $C_s$  – CO<sub>2</sub> kontsentratsioon, kg/m<sup>3</sup>,  
 $C_{s,atm}$  – CO<sub>2</sub> kontsentratsioon atmosfääris, kg/m<sup>3</sup>,  
 $C_{s,emi}$  – täiendav CO<sub>2</sub> kontsentratsioon heiteallikatest, kg/m<sup>3</sup>.



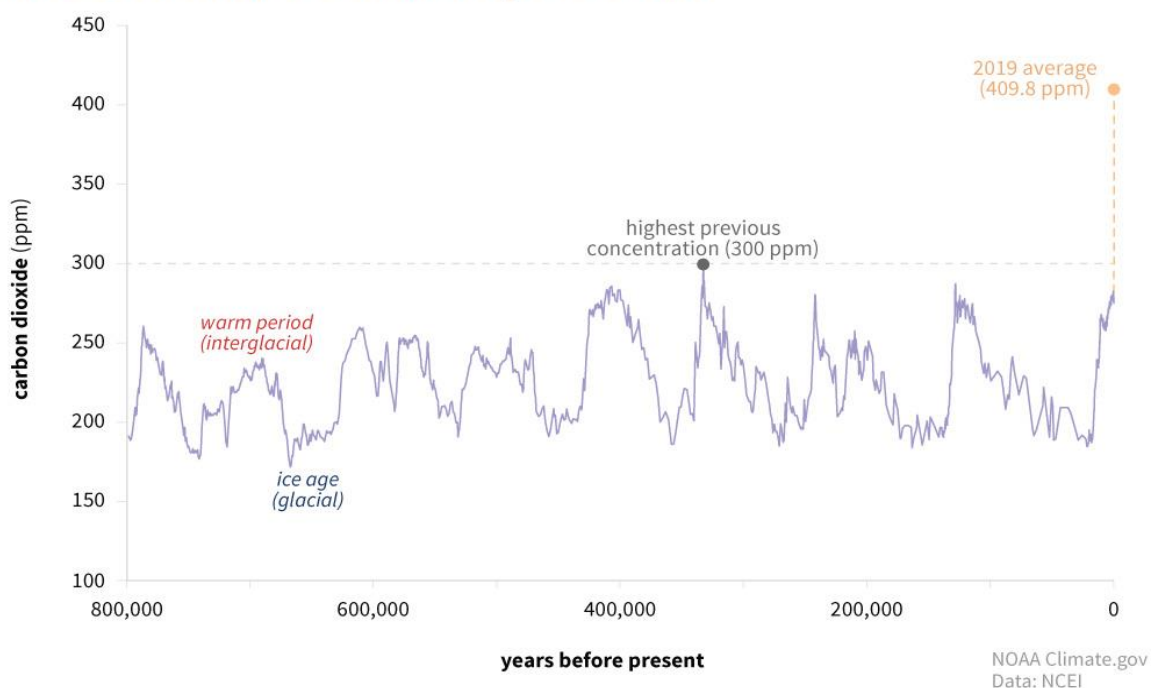
Tavaliste konstruktsioonide puhul on  $C_s$  väärtus võrdne antud piirkonna  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooniga atmosfääris. Antud konstruktsioonide puhul võib kasutada järgnevat valemit.

$$C_s = C_{s,atm} \text{ (valem 2.7) [20]}$$

Täiendavat  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni tuleb arvesse võtta, kui tegemist on tunnelitega või konstruktsioonidega, millele avaldavad mõju muud heiteallikad (näiteks sise põlemismootorite tööst põhjustatud  $\text{CO}_2$  saaste). Keskkonnamõju hindamisel konstruktsioonidele tuleks arvesse võtta ka  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni igaaastast suurenemist, mis on ligikaudu 1,5 ppm/aastas [20].

Jooniselt 2.3 järeldub, et globaalne  $\text{CO}_2$  kontsentratsioon atmosfääris oli 2019 aastal peaaegu 410 ppm. Kui võtta projekteerimise aastaks 2021 ja arvestada igaaastase kontsentratsiooni kasvuga 1,5 ppm/aastas, siis järgmise 100 aasta jooksul tõuseb  $\text{CO}_2$  kontsentratsioon 150 ppm võrra. Süsinikdioksiidi sisaldus õhus sõltub hooajalistest kõikumistest, tuule kiirusest, liiklustihedusest, atmosfääri stabiilsusest ja kohaliku tööstuse  $\text{CO}_2$  heidetest [26]. Siseruumides on  $\text{CO}_2$  kontsentratsioon tavaliselt sarnane välitingimustega. Erandeid esineb näiteks suletud ruumides, kus koguneb suur hulk inimesi (näiteks loenguruumid) [24].

## CARBON DIOXIDE OVER 800,000 YEARS



Joonis 2.3 Global atmospheric carbon dioxide concentrations ( $\text{CO}_2$ ) in parts per million (ppm) for the past 800,000 years [27]

Valemis 2.6 on  $C_s$  ehk  $\text{CO}_2$  kontsentratsioon väljendatud ühikuga  $\text{kg/m}^3$ . Võttes arvesse kahe aastast kontsentratsiooni kasvu saame 2021 aasta väärtuseks 413 ppm, mis on võrdne  $0,00074 \text{ kg/m}^3$ . FIB34 [20] määrab  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooniks  $0,00082 \text{ kg/m}^3$ , mis vastab ca 455 ppm kontsentratsioonile.

Eestis mõõdetakse süsinikdioksiidi sisaldust välisõhus Tahkuse seirejaamas Pärnumaal. Tuginedes antud jaama andmetele on keskmine  $\text{CO}_2$  sisaldus Eestis umbes 430ppm. Võttes arvesse Pärnu kesklinna silla asumist linnakeskkonnas ja suurt autoliikluse osakaalu sillal ja silla läheduses, arvestatakse  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooniga  $0,00082 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.2.7 Ilmategur $W(t)$

Tegur  $W(t)$  kirjeldab karboniseerumisprotsessi betoonpinna vahelduva veeküllastuse (märgumise) tõttu. Selle mõju sõltub otseselt ajast, kuna märgumise mõju edasisele karboniseerumisele väheneb, kui karboniseerumissügavus suureneb. Tegur kirjeldab märgumise efekti sõltuvalt märjast ajast  $ToW$  (*time of wetness*) ja hoovihma mõjust  $p_{SR}$  mittehorisontaalsetel pindadel. Tegur  $W(t) = 1$ , kui  $ToW = p_{SR} = 0$  [22].

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} * ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w \quad (\text{valem 2.8}) \quad [20]$$

kus  $t_0$  – referentsaeg, aastat,  
 $w$  – ilmaeksponent,  
 $ToW$  – märg aeg (time of wetness),  
 $p_{SR}$  – hoovihma tõenäosuse tegur,  
 $b_w$  – regressiooniekspONENT.

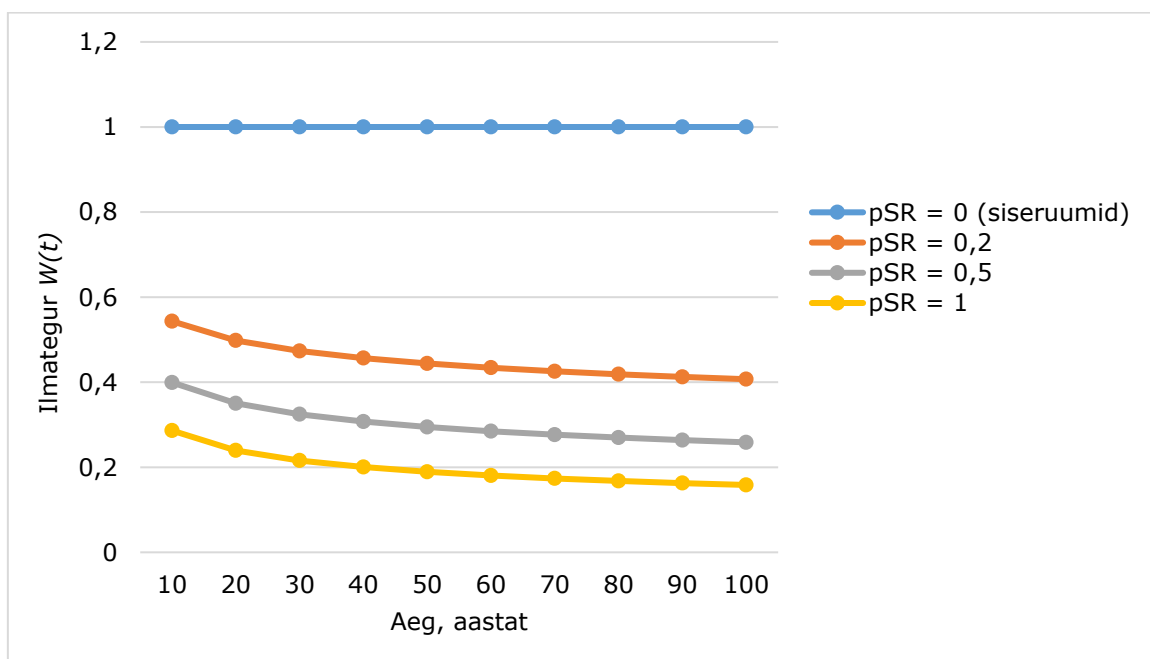
$$ToW = \frac{\text{vihmasajused päevad } h_{Nd} \geq 2,5\text{mm aastas}}{365} \quad (\text{valem 2.9}) \quad [20]$$

Ilmategur sõltub seega kolmest parameetrist – hoovihma tõenäosuse tegur, märjast ajast ja kokkupuute ajast. Valemist ilmneb, et karboniseerumissügavus on maksimaalne minimaalse sademete hulga korral (vihmasajuste päevade arv aastas) ja kui tegemist on siseruumides paiknevate konstruktsioonidega ( $ToW = 0$ ). Selle põhjustab asjaolu, et vihmasadu toob kaasa betoonpinna märgumise, mis vähemalt ajutiselt takistab edasist karboniseerumist, kuna betooni poorid on veega täidetud [21].

Riigi Ilmateenistuse andmetel on Pärnu rannikujaamas mõõdetud väikseim keskmine sademete hulk perioodil 1991 - 2020 maikuus (39 mm) ja suurim augustis (84 mm). Aasta lõikes on kogu sademete hulk 761 mm. Valem 2.8 võtab arvesse vihasajuseid päevi, kus päevane sademete hulk on üle 2,5 mm. Riigi Ilmateenistuselt saadud andemetele tuginedes (Pärnu jaamade registreeritud ööpäeva sademete summad millimeetrites perioodil 2016 - 2020) on leitud kokku nende päevade arv iga aasta kohta, mil sajab keskmiselt  $\geq 2,5$  mm vihma päevas. Perioodil 2016 - 2020 oli vähim sellised päevi 2018 aastal (66 päeva) ning kõige rohkem 2017 ja 2019 aastal (93 päeva). Keskmine antud perioodi lõikes on 81,8 päeva [Lisa 1]. Valemi 2.9 järgi leitav märja aja tegur on 82 vihasajuse päeva korral  $ToW = 0,225$ .

FIB34 defineerib hoovihma tõenäosuse tegurit kui „tuule suuna keskmist jaotust vihasaju ajal“ [20]. Siseruumides või vihmaga mitte kokkupuutuvate konstruktsioonide puhul  $p_{SR} = 0$ . Horisontaalsete elementide korral  $p_{SR} = 1$ . Vertikaalsete betoonpindade puhul jääb seega  $p_{SR}$  vahemikku 0 kuni 1 sõltuvalt tuule suuna keskmisest jaotusest vihasaju ajal ning konstruktsiooni geomeetriast [21]. Juhend soovib väärtust hinnata antud regiooni ilmajaama andmete põhjal, mida aga Riigi Ilmateenistuselt saadud andmete põhjal teha pole võimalik.

Ilmateguri väärtuste muutumist konstruktsioonielementide erineva  $p_{SR}$  väärtuste korral iseloomustab järgnev joonis 2.4. Märja aja tegur  $ToW$  on võetud konstantseks  $ToW = 0,225$ .



Joonis 2.4 Ilmateguri  $W(t)$  sõltuvus erinevate konstruktsioonielementide  $p_{SR}$  väärtuste korral

Jooniselt on näha, et minimaalsed ilmateguri  $W(t)$  on horisontaalsete betoonpindade korral, kui  $p_{SR} = 1$ , arvestades et need pinnad puutuvad otseselt kokku sademetega. Vertikaalsete pindade puhul võib ilmateguri väärtus olla mitmeid kordi suurem, kui horisontaalsete pindade korral, seega on suurem ka karboniseerumissügavus. Tuginedes tabeli 2.4 andmetele ning projekteerides betooni keskkonnaklassile XC4 on jääb teguri  $p_{SR}$  väärtus vahemikku  $0,1 \leq p_{SR} \leq 0,6$ .

### 2.2.8 Temperatuur

Teoreetiliselt suureneb temperatuuri kasvades gaaside difusioonikiirus ja reaktsioonikineetika, kuid  $\text{CO}_2$  ja  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  lahustuvus väheneb [28]. On täheldatud, et karboniseerumiskiirus suureneb koefitsiendiga 1,1, kui temperatuur on vahemikus 20 - 30°C ja väheneb koefitsiendiga 0,9 vahemikus 10 - 20°C [29].

Riigi ilmateenistuse andmetel, on Pärnu rannikujaamas mõõdetud madalaim keskmine õhutemperatuur perioodil 1991 - 2020 veebruaris ( $T = -3,4^\circ\text{C}$ ) ja kõrgeim juulis ( $T = 18,3^\circ\text{C}$ ). Aasta lõikes on keskmine õhutemperatuur  $T = 7,0^\circ\text{C}$ .

Tabel 2.5 Pärnu rannikujaama keskmine õhutemperatuur [23] (Autori poolt kohandatud)

| Keskmine õhutemperatuur (°C) perioodil 1991-2020 |    |      |      |     |      |      |      |      |      |     |     |      |       |
|--|----|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-------|
|  | I  | II   | III  | IV  | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X   | XI  | XII  | Aasta |
| Pärnu  | -3 | -3,7 | -0,5 | 5,4 | 11,4 | 15,4 | 18,3 | 17,2 | 12,5 | 6,8 | 2,2 | -0,9 | 7     |

Kuna kõige suuremaid karboniseerumiskiirusi on oodata, kui keskmine õhutemperatuur on 20°C ringis, võib antud tingimustes jätta temperatuuri mõju tähelepanuta. Lisaks ei käsitle käesolevas uurimistööst kasutatav karboniseerumissügavust hindav toimivuspõhine mudel temperatuuri mõju.

## 2.3 Kloriidide põhjustatud armatuuri korrosioon

Kloriidid jõuavad betooni kahel erineval viisil [30]:

- betooni segu valmistamisel, kasutades kloriide sisaldavaid betoonilisandeid (näiteks kaltsiumkloriid, naatriumkloriid), merevett või mereveega kokkupuutes olnud liiva või kruusa;
- betooni kokkupuutel kloriide sisaldava keskkonnaga – näiteks merelises kliimas või jäätumisvastaste soolade kasutamisel – difusiooni, kapillaarse imemise või absorptsiooni teel.

Täistõenäosuslik projekteerimismeetod kloriididest tingitud korrosioonile – valem pragunemata betoonile:

$$C_{crit.} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) * [1 - erf \frac{a - \Delta x}{2 * \sqrt{D_{app,C} * t}}] \text{ (valem 2.10) [20]}$$

kus  $C_{crit.}$  – kriitiline kloriidisisaldus, %/c,  
 $C(x,t)$  – kloriidisisaldus betoonis sügavusel  $x$  ja ajal  $t$  (konstruktsiooni pind  $x = 0$  m),  
 $C_0$  – esialgne kloriidisisaldus betoonis, %/c,  
 $C_{S,\Delta x}$  – kloriidisisaldus betoonis sügavusel  $\Delta x$  ajal  $t$ , %/c,  
 $x$  – sügavus vastava kloriidisisaldusega  $C(x,t)$ , mm,  
 $a$  – betooni kaitsekiht, mm,  
 $\Delta x$  – konvektsioonitsooni sügavus, mm,  
 $D_{app,C}$  – kloriidi difusioonikoefitsient läbi betooni,  $\text{mm}^2/\text{aastas}$ ,  
 $t$  – aeg, aastat,  
 $erf$  – veafunktsioon.

Valemis 2.1 kasutatava betooni kaitsekihi  $a$  väärtuse leidmiseks kasutatakse peatükis 1.5 tutvustatud põhimõtteid.

### 2.3.1 Kriitiline kloriidisisaldus betoonis $C_{crit}$ .

Kriitilisele kloriidide sisalduse piirile on kaks erinevat definitsiooni [30]:

- piisav kloriidioonide kontsentratsioon, et hävitada metallil olevat passiivset kaitsekihti ( $Fe_2O_3$ ), olenemata sellest, kas see põhjustab nähtavat korrosiooni või mitte;
- piisav kloriidioonide sisaldus, et tekiks metallile nähtavad korrosioonikahjustused.

Kriitilist kloriidisisaldust betoonis on erinevate uurimistööde käigus uuritud [39], kuid tulemustest ei järeldu ühtset kriitilist piiri. Lisaks betooni pH tasemele mõjutab kloriidisisalduse kriitilist piiri ka terasest armatuuri kvaliteet ning armatuuri potentsiaalse energia tase [39]. Antud väärtust tuleks edaspidistes uurimistöodes täpsustada.

FIB76 soovib  $C_{crit}$  väärtusena kasutada keskväärtust  $C_{crit} = 0,6$  %/c, standardhälbega 0,15, võttes alumiseks piiriks  $C_{crit} = 0,2$  %/c ja ülemiseks piiriks  $C_{crit} = 2,0$  %/c [31].

### 2.3.2 Esialgne kloriidisisaldus betoonis $C_0$

Esialgne kloriidisisaldus betoonis sõltub betooni koostisosade (tsement, lisandid, muud agregaadid, vesi) kloriidisisaldusest [31]. Need kloriidid satuvad betooni segu valmistamise hetkel. Standardi EVS-EN 206 järgselt on armeeritud raudbetoonkonstruktsiooni puhul esialgne lubatud maksimaalne kloriidide kontsentratsioon betoonis 0,2 – 0,4 %/tsemendi massist ja eelpingestatud armeeringu korral 0,1 – 0,2 %/tsemendi massist [Tabel 2.6].

Tabel 2.6 Betooni maksimaalne lubatud kloriidisisaldus vastavalt standardile EVS-EN 206 [14] (Autori poolt kohandatud)

| Betooni kasutusala   | Kloriidisisaldusklass* | Maksimaalne Cl sisaldus tsemendi massist**, % |
|--|------------------------|---|
| Ei sisalda terassarrust ega sissebetoneeritud metalloosi (välja arvatud korrosiooni eest kaitstud tõstedetailid) | Cl 1,00                | 1,00  |
| Sisaldab terassarrust või teisi sissebetoneeritud metalloosi   | Cl 0,20                | 0,20  |
|  | Cl 0,40***             | 0,40  |
| Sisaldab eelpingestatud terassarrust vahetus kontaktis betooniga   | Cl 0,10                | 0,10  |
|  | Cl 0,20                | 0,20  |

\* Eriotstarbeliste betoonide puhul sõltub klassi valik betooni kasutamiskohas kehtivatest eeskirjadest.

\*\* Kui on kasutatud peenlisandeid ja neid on tsemendisisalduses arvesse võetud, siis esitatakse kloriidisisaldus kui kloriidiooni massiprotsent tsemendi pluss arvesse võetud peenlisandi summaarsest massist.

\*\*\* Kasutuskohas kehtivate eeskirjade kohaselt võib CEM-III tsemente sisaldavates betoonides olla lubatud kasutada erinevaid kloriidisisalduse klasse.

Üldjuhul standardites levinud kloriidide sisalduse piirväärtuse ühik on kloriidide sisaldus protsentides tsemendi massist betoonis (%/c). Selline ühik on kasulik ning hästi illustreeriv, kuna koos tsemendisisalduse suurenemisega suureneb ka kloriidikindlus betoonis [38].

Kaasaegsete betoonisegude puhul jääb esialgne kloriidide sisaldus alla 0,05 %/c, seega peab FIB76 antud teguri väärtust ebaoluliseks ja  $C_0$  väärtusena kasutatakse väärtust  $C_0 = 0$  %/c [31]. Antud eeldusega arvestatakse ka käesolevas magistritöös.

### 2.3.3 Kloriidi difusioonikoefitsent $D_{app,C}$

Antud koefitsenti kasutatakse betooni difusioonilisuse kirjeldamiseks. Veega küllastunud betooni puhul mõjutab kloriidi difusioonikoefitsenti enim betooni pooride struktuur (pooride arv ja suuruse jaotus) [31]. Arvutusteks vajalikud kloriidiprofiilid saab leida olemasolevate konstruktsioonidest või katsekehadelt, mida on hoitud sarnastes tingimustes projekteeritava konstruktsiooni keskkonnaga [31].

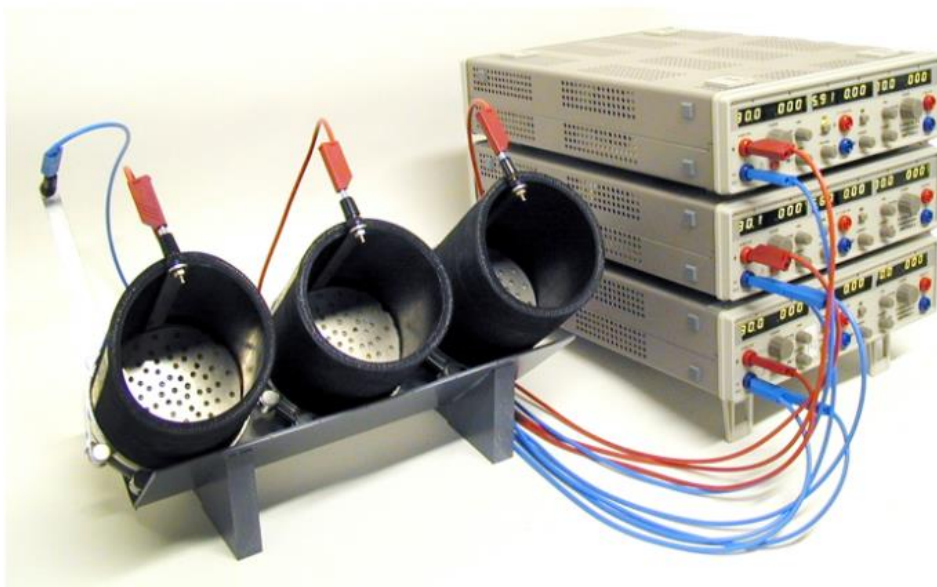
$$D_{app,C} = k_e * D_{RCM,0} * k_t * A(t) \text{ (valem 2.11) [20]}$$

kus  $D_{RCM,0}$  – kloriidi migratsioonikoefitsent,  $\text{mm}^2/\text{a}$ ,  
 $k_t$  – ülekandeparameeter, edaspidi  $k_t = 1$ ,  
 $k_e$  – difusiooni temperatuurisõltuvuse parameeter,  
 $A(t)$  – vananemise alafunktsioon.

Teguri  $D_{app,C}$  määramiseks tuleks kasutada kloriidide profileerimise meetodit, mis on kirjeldatud standardis EVS-EN 12390-11 [40]. Antud meetodil on kloriidi difusioonikoefitsendi määramine aga väga aeglane, mistõttu kasutatakse kiirendatud meetodit RCM testi näol [31].

### 2.3.4 Kloriidi migratsioonikoefitsent $D_{RCM,0}$

Katsekehade abil difusioonikoefitsendi määramine on aeglane protsess, mistõttu kasutatakse kiirendatud RCM testi (*Rapid Chloride Migration test*). Antud testmeetodi puhul kiirendatakse kloriidide sisenemist betooni rakendades veega küllastunud katsekehale elektrivälja, misjuures difusiooni mõju kloriidide sisenemisele muutub ebaoluliseks [31].



Joonis 2.5 RCM testi katseseadeldis [41]

Antud töös kasutatavad FIB76 väärtused [Tabel 2.7] on indikatiivsed ja uute konstruktsioonide projekteerimisel tuleks kloriidide migratsioonikoefitsendid leida iga kasutatava betoonisegu puhul. Teguri  $D_{RCM,0}$  määramiseks katsete abil võib Eestis kasutada standardit EVS-EN 12390-18 [41].

Tabel 2.7  $D_{RCM,0}$  keskvaartused, kui  $t_0 = 28$  päeva [31] (Autori poolt kohandatud)

| Tsemendi tüüp | $D_{RCM,0}$ (mm <sup>2</sup> /a) |           |           |           |           |           |
|---------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|               | $w/c$                            |           |           |           |           |           |
|               | 0,35                             | 0,40      | 0,45      | 0,50      | 0,55      | 0,60      |
| CEM I         | määramata                        | 280,9     | 315,6     | 498,6     | 621,7     | 788,9     |
| CEM II/A-S    | määramata                        | 220,9     | 252,5     | määramata | määramata | määramata |
| CEM II/A-D    | määramata                        | 126,2     | 142,0     | 151,5     | 157,8     | määramata |
| CEM II/A-V    | 176,7                            | 217,7     | 284,0     | 344,0     | 470,2     | määramata |
| CEM II/B-V    | määramata                        | määramata | määramata | määramata | määramata | määramata |
| CEM II/A-LL   | määramata                        | 296,6     | 403,9     | 476,5     | määramata | määramata |
| CEM III/A     | määramata                        | 123,1     | 123,1     | 132,5     | määramata | määramata |
| CEM III/B     | määramata                        | 44,2      | 60,0      | 88,4      | 94,7      | 107,3     |



### 2.3.5 Difusiooni temperatuurisõltuvuse parameeter $k_e$

Kuna kloriidide edasikandumine betoonis on termodünaamiline protsess, on kloriidide difusioonikiirus betoonis mõjutatud temperatuurist. Kasutusele on võetud keskkonnaülekanne parameeter  $k_e$ , mis võtab arvesse välistemperatuuri  $T_{real}$  mõju kloriidide difusioonikiirusele [31].

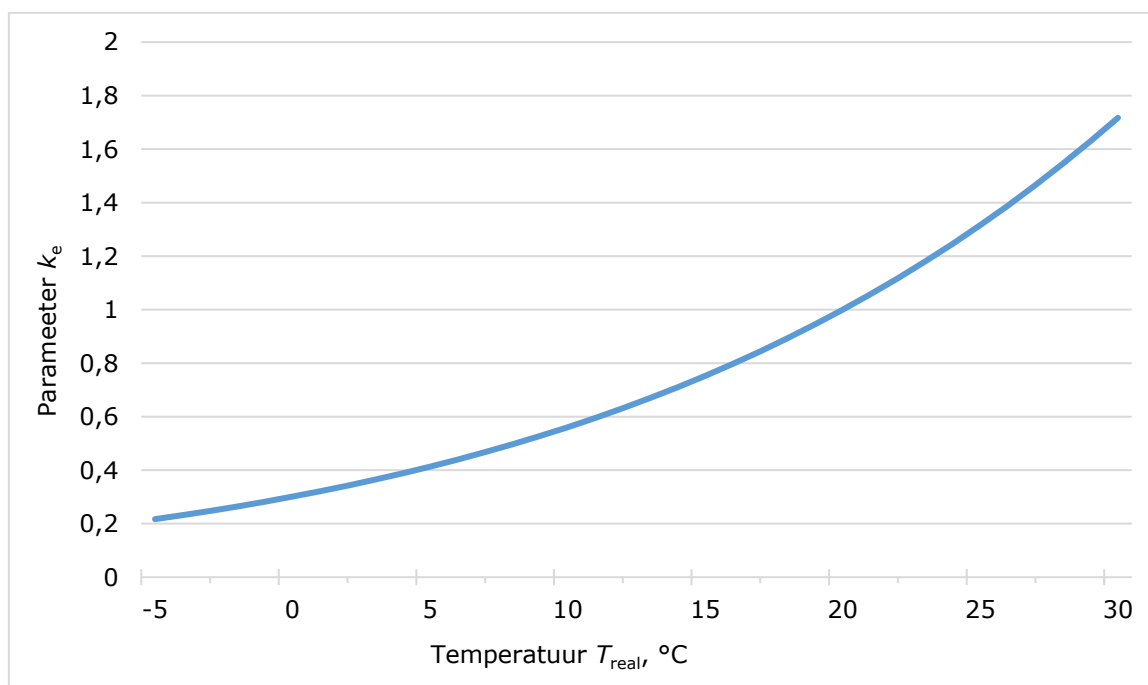
$$k_e = \exp \left( b_e * \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \text{ (valem 2.12) [20]}$$

kus  $b_e$  – temperatuurikoefitsent, K,

$T_{ref}$  – referents temperatuur, K,

$T_{real}$  – konstruktsiooni elemendi või ümbritseva õhu temperatuur, K.

$T_{ref} = 293 \text{ K (} 20^\circ\text{C)}$  on standard temperatuur laboritingimustest difusioonikoefitsendi ja RCM testil. Juhul kui difusioonikoefitsent  $D_{app,c}$  kloriidiprofiilid leitakse olemasolevatelt konstruktsioonidelt, on referents temperatuuri  $T_{ref}$  võrdne neid konstruktsioone ümbritseva aasta keskmise õhutemperatuuriga [31]. Valemit 2.12 kasutades on leitud parameetri  $k_e$  väärtused sõltuvalt ümbritseva õhu temperatuurist [Joonis 2.6].



Joonis 2.6 Parameetri  $k_e$  sõltuvus temperatuurist  $T_{real}$

Riigi ilmteenistuse andmetel, on Pärnu rannikujaamas mõõdetud madalaim keskmine õhutemperatuur perioodil 1991 - 2020 veebruaris ( $T = -3,4^\circ\text{C}$ ) ja kõrgeim juulis ( $T =$

18,3°C). Aasta lõikes on keskmine õhutemperatuur  $T = 7,0^{\circ}\text{C}$ . Temperatuuri  $T_{\text{real}} = 7,0^{\circ}\text{C}$  korral on parameeter  $k_e = 0,467$ .

### 2.3.6 Vananemise alafunktsioon $A(t)$

Kloriidi difusioonikoefitsendi  $D_{\text{app,C}}$  valemis sisalduv vananemise alafunktsioon  $A(t)$  on kirjeldatud järneva valemiga:

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \text{ (valem 2.13) [20]}$$

kus  $a$  – vananemise eksponent,

$t_0$  – referentsaeg (RCM testi sooritamise aeg, 28 päeva), aastat,

$t$  – aeg, aastat.

Tabel 2.8 Vananemise eksponent  $a$  keskkonnaklasside XD2, XD3, XS2 ja XS3 korral [31] (Autori poolt kohandatud)

| Tsemendi tüüp             | Vananemise eksponent |                         |
|---------------------------|----------------------|-------------------------|
|                           | Keskväärtus, $\mu$   | Standardhälve, $\sigma$ |
| $0,40 \leq w/c \leq 0,60$ |                      |                         |
| CEM I                     | 0,30                 | 0,12                    |
| CEM II/A-S                | 0,35                 | 0,16                    |
| CEM II/A-D                | 0,40                 | 0,16                    |
| CEM II/A-V                | 0,60                 | 0,15                    |
| CEM II/B-V                | 0,60                 | 0,15                    |
| CEM II/A-LL               | 0,30                 | 0,12                    |
| CEM III/A                 | 0,40                 | 0,18                    |
| CEM III/B                 | 0,45                 | 0,20                    |

Vananemise eksponent  $a$  näitab kloriidi difusioonikoefitsendi  $D_{\text{app,C}}$  vähenemist ajas, võttes arvesse nii kasutatavaid materjale ja keskkonningimusi [32]. Eksponendi määramiseks tuleb hinnata olemasolevate konstruktsioonide difusioonikoefitsendi  $D_{\text{app,C}}$  pikaajalist käitumist, analüüsides kloriidiprofiilide arenemist aja jooksul [31].

Tabel 2.9 Vananemise eksponent  $a$  keskkonnaklasside XD1 ja XS1 korral [31] (Autori poolt kohandatud)

| Tsemendi tüüp       | Vananemise eksponent |                         |
|---------------------|----------------------|-------------------------|
|                     | Keskväärtus, $\mu$   | Standardhälve, $\sigma$ |
| Kõik tsemenditüübid | 0,65                 | 0,12                    |

### 2.3.7 Kloriidisisaldus betooni pinnal $C_{s0}$ ja $C_{s,\Delta x}$

Kloriidisisaldus betooni pinnal  $C_{s0}$  ja sügavusel  $\Delta x$  kloriidisisaldus  $C_{s,\Delta x}$  on muutujad, mis sõltuvad materjali omadustes, geomeetriast ning keskkonnatingimustest. Enim mõjutavad tegureid betooni koostis ja kasutatava sideaine tüüp ning keskkonnamõju mõjutab enim ümbritseva keskkonna kloriidikontsentratsioon. Konstruktsiooni geomeetria puhul mängib suurt rolli tuule suund ja konstruktsiooni kaugus kloriidiallikast [31].

Kloriidisisaldus kloriididega saastunud vees, mis on põhjustatud talvisest teesoolamisest on palju suurem, kui merevee kloriidisisaldus. Täpne kloriidide mõju hindamine on väga raske, sest soola hulka, mida kasutatakse on raske hinnata selle hooajalise kasutamise tõttu. Linnakeskkonna puhul (XD1, XD2, XD3) soovitab DARTS kasutada variatsioonikordajat  $CoV = 75\%$ , sest teesoolade kasutamise tiheduses ja soolade hulgas on suured erinevused [31].

Tabel 2.10 Betooni pinna kloriidisisaldus sõltuvalt keskkonnaklassist [31] (Autori poolt kohandatud)

| Keskkonnaklass | $C_{s0}/C_{s,\Delta x}$ |              |
|----------------|-------------------------|--------------|
| XD1            | $0,5 \leq \mu \leq 1,5$ | $CoV = 0,75$ |
| XD2            | $2,0 \leq \mu \leq 4,0$ | $CoV = 0,75$ |
| XD3            | $2,0 \leq \mu \leq 4,0$ | $CoV = 0,75$ |
| XS1            | $1,0 \leq \mu \leq 2,0$ | $CoV = 0,45$ |
| XS2            | $2,0 \leq \mu \leq 4,0$ | $CoV = 0,25$ |
| XS3            | $2,0 \leq \mu \leq 4,0$ | $CoV = 0,45$ |

### 2.3.8 Konvektsioonitsooni sügavus $\Delta x$

Kui konstruktsioonelement on vaheldumisi kokkupuutes kloriidide sisaldava lahusega ja kuival perioodil atmosfääriga, kui vesi betooni pinnakihtidest aurustub, siis toimub kapillaarne imendumine iga järgneva betoonpinna märgumise korral. See protsess põhjustab kiire kloriidide sattumise betooni sügavuseni  $\Delta x$ , kus kloriide koguneb kuni kloriidide sisaldus  $C_{s,\Delta x} = C_{s0}$  on saavutatud [31].

Tabel 2.11 Konvektsioonitsooni sügavus  $\Delta x$  [31] (Autori poolt kohandatud)

| Keskkond                          | $\Delta x$          |                         |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|
|                                   | Keskväärtaus, $\mu$ | Standardhälve, $\sigma$ |
| Pritsmed (XS1, XD1)               | 0                   |                         |
| Veealune (XD2, XS2)               |                     |                         |
| Pritsmed, rannikuäärne (XD3, XS3) | 10                  | 5                       |

### 3 TOIMIVUSPÕHISTE MUDELITE ANALÜÜS JA TULEMUSTE VÕRDLOS

#### 3.1 Pärnu kesklinna silla tekiplaadi projekteerimine kehtivate standardite järgi

Pärnu kesklinna silla laiendamise ja rekonstrueerimise projektlahendus on jagatud kahte etappi, millest teine näeb ette silla laiendamise ja uue raudbetoonist tekiplaadi ehitamist. Silla projekteeritud kasutusiga peale renoveerimistööd on 50 aastat. Olemasolev raudbetoonist tekiplaat asendatakse peale terastalade renoveerimist uue laiendatud raudbetoonist tekiplaadiga. Tekiplaat rajatakse ühtlase ristlõikega monoliitselt vastavalt kattealuse projektkõrgusele [35].

Tekiplaadi betoonile vajalikud keskkonnaklassid on valitud vastavalt selle keskkonnamõjuritele. Projektselt on betoonile valitud standardi EVS-EN 206:2014 järgsele liigitusele keskkonnaklassid XC3 / XD1 / XF2 ja EVS-EN 814:2003 järgsele liigitusele külmakindluse klass KK2.

Tabel 3.1 Pärnu kesklinna silla rekonstrueerimine, betooni lähteandmed

| Lähteandmed         |                         |
|---------------------|-------------------------|
| Kasutusiga          | 50 aastat               |
| Keskkonnaklass      | XC3* / XD1* / XF2 / KK2 |
| Betooni klass       | C35/45                  |
| Konstruksiooniklass | S4                      |

\* Käesolevas töös kasutatakse lisaks keskkonnaklasse XC4 ja XD3

Tabel 1.5 soovib eri keskkonnaklasside korral kasutada erinevaid betooni minimaalseid tugevusklasside. Klassi XD3 korral on soovitatav betoon minimaalselt C35/45, XC4 korral C30/37 ja XF2 puhul C25/30. Tekiplaadi betooniks on projektis valitud C35/45, mis on vajalik konstruktsiooni kandevõimet silmas pidades. Antud töös määrab betooni C35/45 kasutamise keskkonnaklass XD3.

Kui valitud betooniklass on sama või suurem soovitatavast betooniklassist, siis on standardis soovitatav konstruktsiooniklass S4, kui projekteeritakse kasutuseaks 50

aastat. Magistritöö projekteeritakse lisaks tekiplaat elueaga 100 aastat, mille puhul arvestatakse konstruktsiooniklassiga S6.

Armatuurterase kestvusest tulenevad betooni kaitsekihi  $c_{min,dur}$  väärtused määratakse vastavalt standardi EVS-EN 10080:2006 soovitatud väärtustele. Konstruktsiooniklassi S4 korral, kui määravaks saab keskkonnaklass XC4, on betooni kaitsekihi paksus tabeli 1.7 järgi 30 mm, keskkonnaklassi XD3 puhul 45 mm. Konstruktsiooniklassi S6 korral, kui määravaks saab keskkonnaklass XC4, on kaitsekihi paksus 40 mm, keskkonnaklassi XD3 puhul 55 mm.

Konstruktsiooni elementidel tuleb määrata nimikaitsekiht  $c_{nom}$ , mis on minimaalse kaitsekihi  $c_{min,dur}$  ja hälbe  $\Delta c_{dev}$  summa. Standardi EVS-EN 1992-1-1 ptk. 4.4.1.3 punkt 1 soovitab hälbe väärtuseks võtta 10 mm. Nominaalsed kaitsekihid leitakse valemi 1.1 abil.

Tabel 3.2 Projekteeritud betooni kaitsekihid tekiplaadi kasutuseaga 50 ja 100 aastat

| Kasutusiga, aastat    | 50     |     |     |     | 100 |     |     |     |
|-----------------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Betooni klass         | C35/45 |     |     |     |     |     |     |     |
| Konstruktsiooniklass  | S4     |     |     |     | S6  |     |     |     |
| Keskkonnaklass        | XC3    | XC4 | XD1 | XD3 | XC3 | XC4 | XD1 | XD3 |
| $c_{min,dur}$ , mm    | 25     | 30  | 35  | 45  | 35  | 40  | 45  | 55  |
| $\Delta c_{dev}$ , mm | 10     |     |     |     |     |     |     |     |
| $c_{nom}$ , mm        | 35     | 40  | 45  | 55  | 45  | 50  | 55  | 65  |

### 3.2 Karboniseerumismudeli analüüs

Peatükis 2.2 tutvustati ja selgitati karboniseerumismudelis sisalduvaid tegureid ja nende mõju karboniseerumisele. Antud töös katsetatakse karboniseerumise toimivuspõhist mudelit Pärnu kesklinna silla tekiplaadi projekteerimiseks. Koondatud sisendandmed on esitatud tabelis 3.3.

Tabel 3.3 Karboniseerumismudeli lähteandmed

| Tegur            |                  | Kirjeldus                                     | Ühik                | Jaotus   | Keskvärtus, $\mu$             | Standardhälve, $\sigma$          | a  | b   |
|------------------|------------------|---|---------------------|----------|-------------------------------|----------------------------------|----|-----|
| $k_e$            | $RH$             | Karboniseerunud pinna suhteline õhuniiskus    | %                   | Beeta    | 81 (Tabel 2.3)                | -                                | 60 | 100 |
|                  | $RH_{ref}$       | Referents suhteline õhuniiskus                | %                   | Konstant | 65                            | -                                | -  | -   |
|                  | $f_e$            | EkspONENT                                     | -                   | Konstant | 5                             | -                                | -  | -   |
|                  | $g_e$            | EkspONENT                                     | -                   | Konstant | 2,5                           | -                                | -  | -   |
| $k_c$            | $t_c$            | Järelhoolduse aeg                             | päeva               | Konstant | 7                             | -                                | 1  | 30  |
|                  | $b_c$            | RegressiooniekspONENT                         | -                   | Normaal  | -0,567                        | 0,024                            | -  | -   |
| $R_{MAC,0^{-1}}$ | $k_t$            | ACC katse regressiooniparameeter              | -                   | Normaal  | 1,25                          | 0,35                             | -  | -   |
|                  | $R_{ACC,0^{-1}}$ | Betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus | $(m^2/s)/(kg/m^3)$  | Normaal  | Tabel 2.2                     | $0,69 * R_{ACC,0^{-1}}^{1,0,76}$ | -  | -   |
|                  | $\epsilon_t$     | Veatingimus                                   | $(mm^2/a)/(kg/m^3)$ | Normaal  | 315,5                         | 48                               | -  | -   |
| $C_s$            |                  | CO <sub>2</sub> kontsentratsioon              | kg/m <sup>3</sup>   | Normaal  | 0,00082                       | 0,0001                           | -  | -   |
| $W(t)$           | $t_{SL}$         | Projekteeritud eluiga                         | aastat              | Konstant | 50/100                        | -                                | 10 | 100 |
|                  | $t_0$            | Referentsaeg                                  | aastat              | Konstant | 0,0767                        | -                                | -  | -   |
|                  | $p_{SR}$         | Hoovihma tõenäosuse tegur                     | -                   | Konstant | 0,1 ≤ $\mu$ ≤ 0,6 (Tabel 2.4) | -                                | -  | -   |
|                  | $ToW$            | Märg aeg ( <i>time of wetness</i> )           | -                   | Konstant | 0,225 (Ptk. 2.2.7)            | -                                | -  | -   |
|                  | $b_w$            | RegressiooniekspONENT                         | -                   | Normaal  | 0,446                         | 0,163                            | -  | -   |

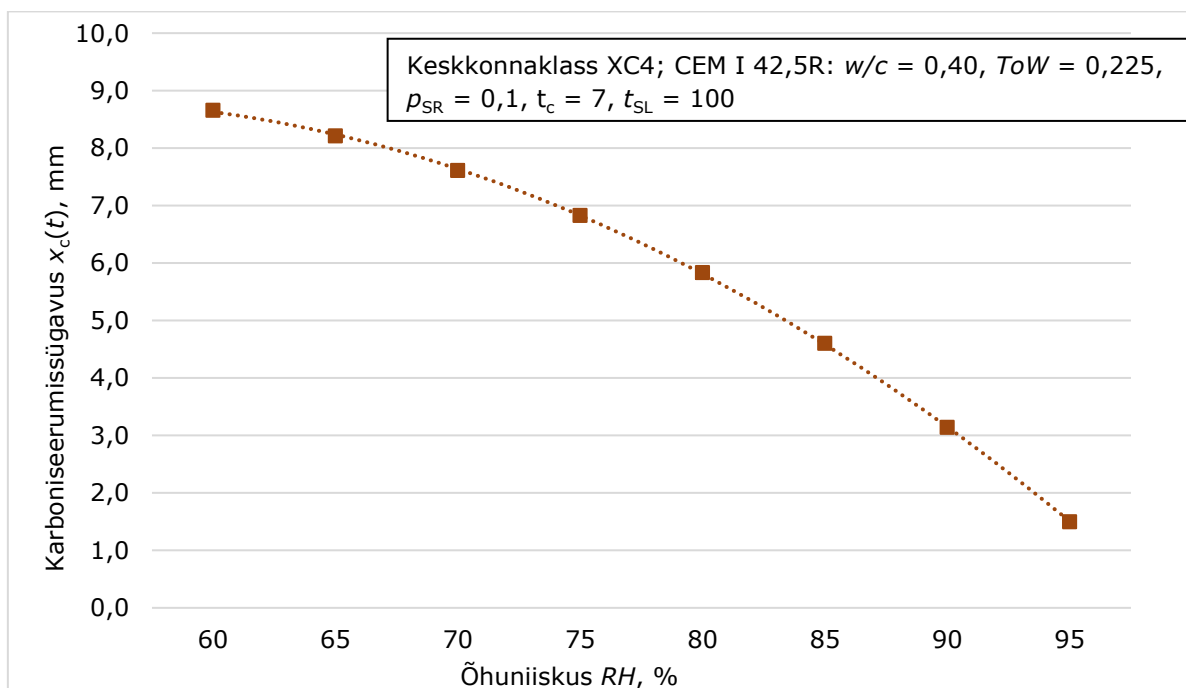
Mudeli erinevate sisendandmete rohkus võimaldab selle laialdast kasutust betoonkonstruktsioonide projekteerimisel erinevates tingimustes. Mudeli kasutajal on võimalik mitmete lähteandmete muutmine vastavalt kohalikele oludele. Oluline on aga tähele panna, et teguritel on karboniseerumissügavusele väga erineva kaaluga mõju.

Erinevate regioonide ilmajaamade infot kasutades on võimalik lähteandmetena kasutada piirkonnale omast õhuniiskust. Analüüsidest sademeid saab leida vajalikud tegurid ilma mõju arvestamiseks. Betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtused ( $R_{MAC,0^{-1}}$  ja/või  $R_{ACC,0^{-1}}$ ) tuleks leida kõikide konkreetsetes piirkonnas kasutatavate tsemendisegude kohta, et oleks võimalik leida optimaalseim variant kestva betooni projekteerimiseks. Projekteerija saab koos omanikuga välja pakkuda sobiva rajatise kasutusea ja täpsustada konstruktsiooni ehitajale nõutavat betooni järelhoolduse aega, millega on antud mudelis arvestatud.

Erinevate tegurite mõju näitlikustamiseks lõplikule karboniseerumissügavusele on koostatud graafikud. Võrdluse ühtlustamiseks on kasutatud keskkonnaklassi XC4 ( $RH = 81\%$ ), tsemendina portlandtsementi CEM I 42,5 R vesitsementteguriga  $w/c = 0,40$  (Eesti tingimustes kasutatav tsement, mille kohta leidis kasutatud teadusartiklites lähteandmeid) ning märja aja tegurit  $ToW = 0,225$  (arvutatud vastavalt piirkonna

ilmajaama andemetele, ptk. 2.2.7). Teisi mudeli sisendandmeid on muudetud vastavalt konkreetsele teguri võimalikele väärtustele.

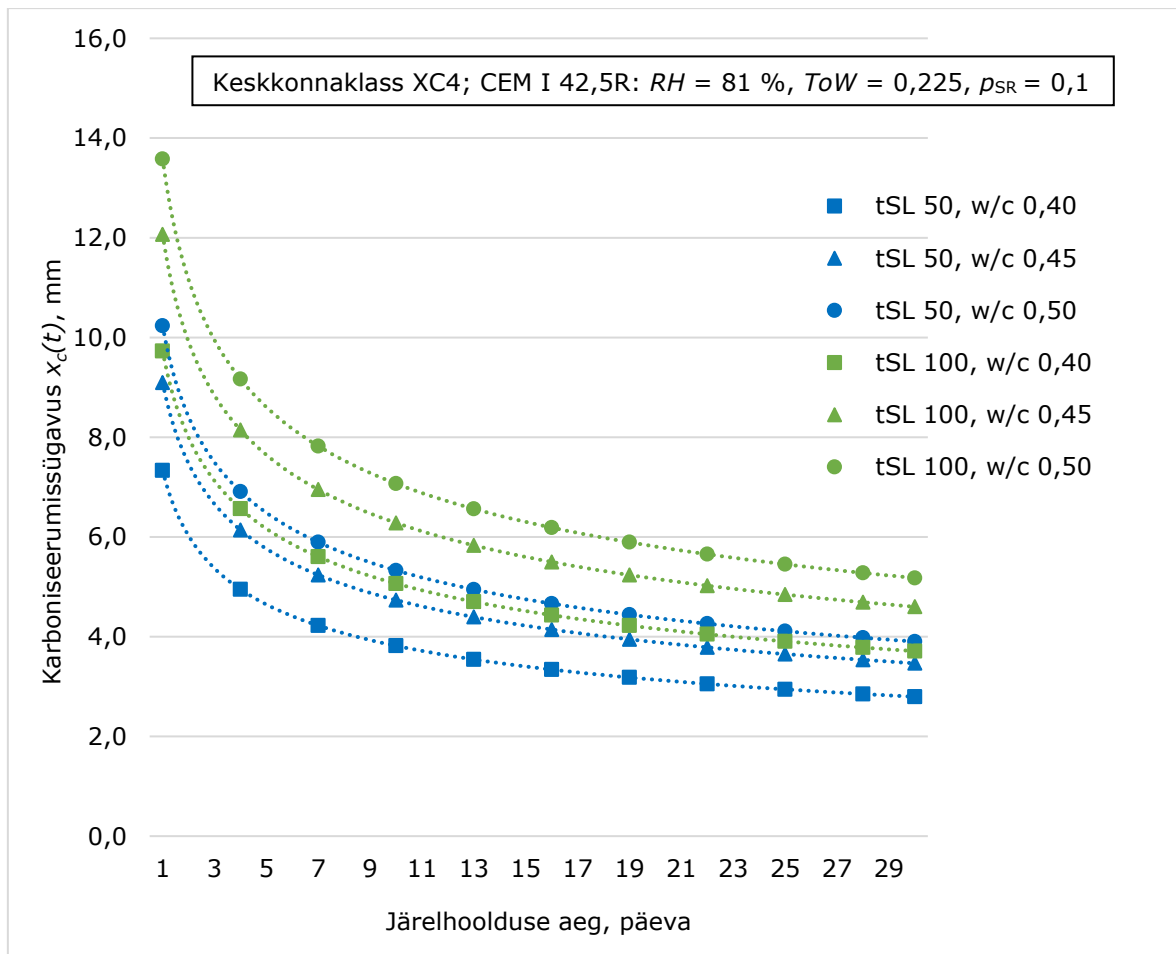
Suhtelise õhuniiskuse  $RH$  kasvades langeb betooni karboniseerumissügavus  $x_c(t)$ . Soovitatav õhuniiskuse vahemik mudelis kasutamiseks on  $RH = 60 - 100$  % vastavalt [20]. Madalaima õhuniiskuse  $RH = 60$  % korral on karboniseerumine üle nelja korra suurem, kui õhuniiskuse  $RH = 95$  % korral. Karboniseerumissügavus väheneb õhuniiskuse suurenemisel sarnaselt keskkonnategurile  $k_e$ , mille sõltuvus on näidatud joonisel 3.1 ja joonisel 2.2.



Joonis 3.1 Karboniseerumissügavus  $x_c(t)$  sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest  $RH$

Järelhoolduse mõju betooni karboniseerumissügavusele kirjeldab joonis 3.2. Võrreldud on järelhoolduse mõju sõltuvalt projekteeritud kasutuseast  $t_{SL}$  (50 ja 100 aastat) ning vesitsementtegurist  $w/c$  (0,40, 0,45 ja 0,50). Kõikidel juhtudel on mõju lõplikule karboniseerumissügavusele sarnaselt kirjeldatav. Kõige olulisemad on betooni järelhoolduse esimesed 7 päeva, kui on võimalik saavutada ca 40 % väiksem karboniseerumissügavus. Pikendades järelhoolduse perioodi 30 päevani, on võimalik 60 % - 70 % väiksem betooni karboniseerumissügavus.

Betoonkonstruktsiooni järelhoolduse aja teguri mõju on uuritavas karboniseerumismudelis väga suur. Täiendavalt tuleks uurida ja arvesse võtta, millised betooni järelhoolduse võtted mõjutavad karboniseerumissügavust kõige rohkem ja kas mudelis tegurile antud mõju võib olla üle hinnatud.



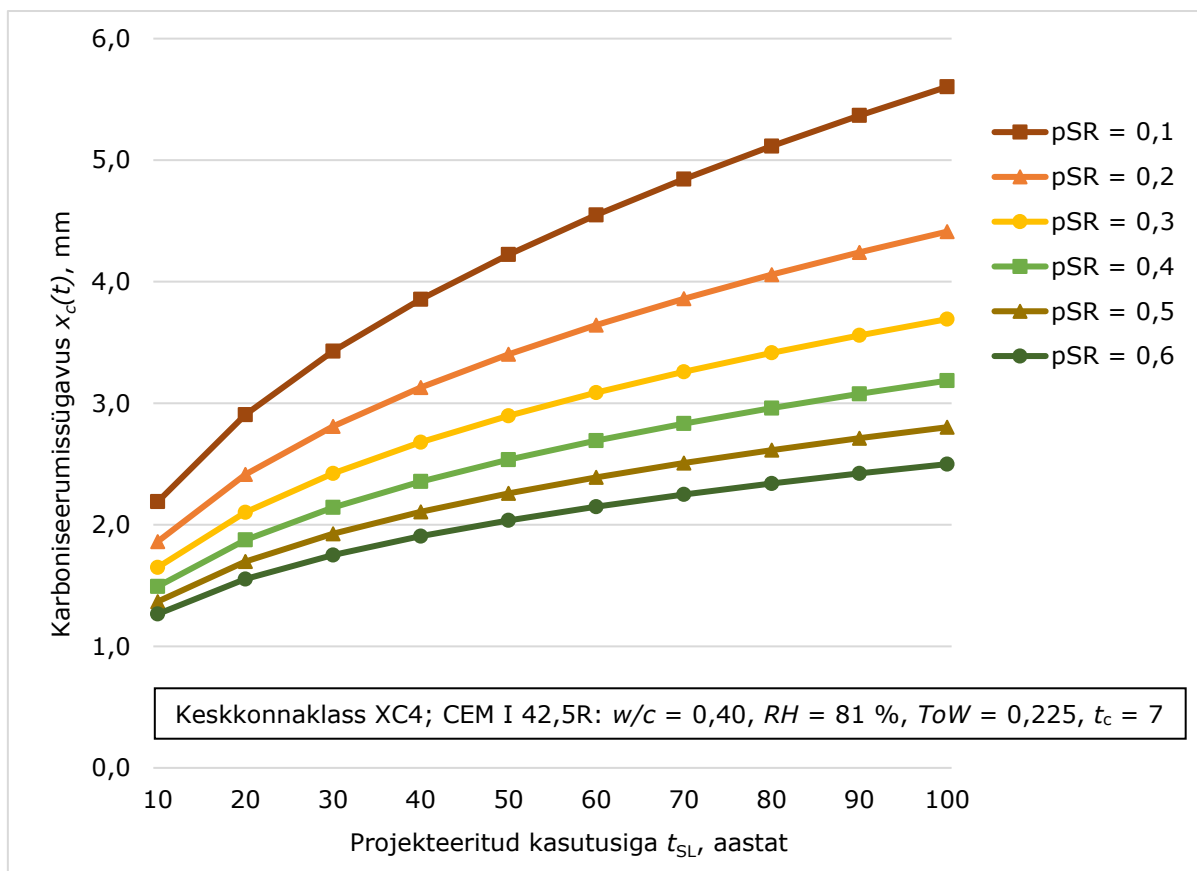
Joonis 3.2 Karboniseerumissügavuse  $x_c(t)$  sõltuvus järelhoolduse ajast

Projekteerides betooni tabeli 2.3 andmetel keskkonnaklassile XC4, jääb teguri  $p_{SR}$  väärtus vahemikku  $0,1 \leq p_{SR} \leq 0,6$ . Joonis 3.3 väljendab karboniseerumissügavuse  $x_c(t)$  sõltuvust hoovihma tõenäosuse tegurist  $p_{SR}$  projekteeritud kasutusea jooksul. Selgub, et väiksema  $p_{SR}$  väärtuse korral (vertikaalsem pind) on karboniseerumissügavus suurem. Kui konstruktsioonil on erineva asetusega betoonpindasid (horisontaalsed ja vertikaalsed), soovitatakse rakendada ebasoodsaimat  $p_{SR}$  väärtust. FIB34 järgi tuleks väärtust hinnata piirkonna ilmaandmete põhjal, sõltuvalt tuule suuna keskmisest jaotusest vihmajärgu ajal. Kuna kasutusea perioodi pikenedes saab teguri mõju karboniseerumissügavusele enam määravamaks, tuleks selle täpse väärtuse leidmist täiendavalt uurida ja luua juhised teguri määramiseks regiooni ilmaandmete põhjal.

Lisaks hoovihma tõenäosuse tegurile sisaldub ilmateguri  $W(t)$  valemis ka märja aja tegur  $ToW$ , mis võtab arvesse need päevad, kus sademete hulk on üle 2,5 mm. Uuritav karboniseerumismudel ei arvesta sajupäevade jaotumist aasta lõikes ja regiooni õhutemperatuuri. Sajuste päevade jaotumise mõju koos täpsemate ilmaandmetega tuleks enne täpsemate mudelite loomist uurida ja saadud tulemusi arvesse võtta.



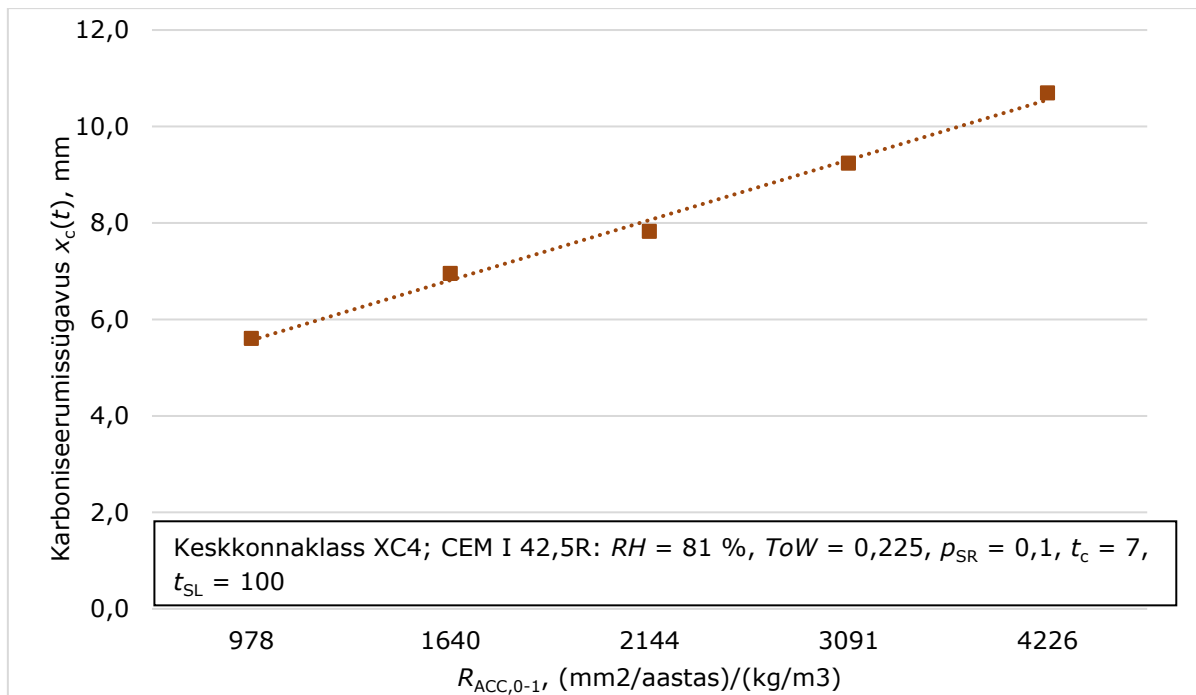
Edaspidi kasutatakse antud töös teguri väärtusena  $p_{SR} = 0,1$ , kuna Pärnu Ilmajaama andmetel ei ole võimalik hoovihma tõenäosuse teguri täpset väärtust välja arvutada.



Joonis 3.3 Karboniseerumissügavuse  $x_c(t)$  sõltuvus hoovihma tõenäosuse tegurist

Joonisel 3.4 on näidatud karboniseerumissügavuse  $x_c(t)$  sõltuvus tabeli 2.2 alusel määratud  $R_{ACC,0^{-1}}$  väärtustele vastavalt tsemendi tüübile CEM I 42,5 R ja vesitsementtegurile  $w/c = 0,40 - 0,60$ . Antud graafikust järeldub, et karboniseerumissügavuse kasv on vesitsementteguris kasvades lineaarne.

Valemis 2.3 esitatud betooni karbonisatsioonikindluste pöördväärtuste  $R_{NAC,0^{-1}}$  ja  $R_{ACC,0^{-1}}$  ja nende sõltuvuse kirjeldamiseks kasutatavate tegurite  $k_t$  ja  $\epsilon_t$  seos kehtib ainult FIB34 kirjeldatud ACC testi katsemeetodit kasutades. Teiste standardite meetodikaid kasutades, tuleb katsetamisel saadud tulemuste seost mudelis kasutatavate väärtustega  $R_{NAC,0^{-1}}$  ja  $R_{ACC,0^{-1}}$  täiendavalt uurida.

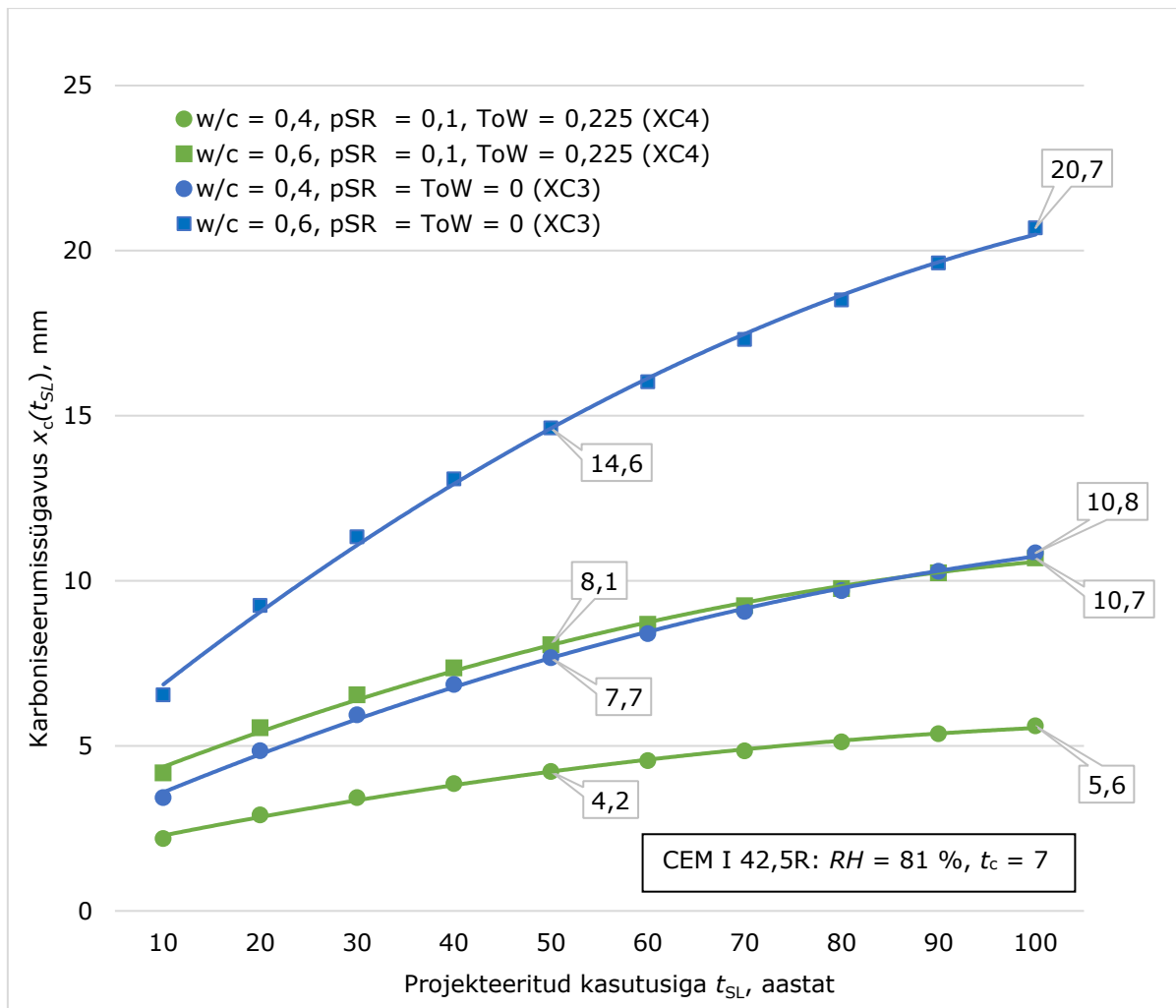


Joonis 3.4 Karboniseerumissügavus  $x_c(t)$  sõltuvus betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtusest  $R_{ACC,0-1}$

Eelpool täpsustatud tegurite väärtused on koondatud ja võetud arvesse lõpliku karboniseerumissügavuse leidmiseks [Joonis 3.5], kasutades portlandtsementi CEM I 42,5 R, piirkonna suhtelist õhuniiskust  $RH = 81\%$  ning järelhoolduse aega  $t_c = 7$  päeva. Keskkonnaklasse XC3 ja XC4 on rakendatud koos soovitatavate  $ToW$  ja  $p_{SR}$  väärtustega vastavalt tabelile 2.4. Lisaks hinnatakse mõju sõltuvalt vesitsementtegurist  $w/c$  (väärtustel 0,40 ja 0,60).

Karboniseerumissügavus keskkonnaklassi XC4 ja  $w/c = 0,40$  korral on madalaim, olles projekteeritud kasutusea  $t_{SL} = 50$  aastat korral 4,2 mm ning  $t_{SL} = 100$  aastat puhul 5,6 mm. Betoonidel XC4 /  $w/c = 0,60$  ning XC3 /  $w/c = 0,40$  on väga sarnane karboniseerumissügavus, mis 50 aasta korral on vastavalt 8,1 mm ja 7,7 mm ja 100 aasta korral 10,7 mm ja 10,8 mm. Suurimat karboniseerumist on oodata keskkonnaklassi XC3 /  $w/c = 0,60$  puhul, kui tulemused on 14,6 mm ja 20,7 mm.

Eelkirjeldatud tulemustest järeldub, et kui betoon puutub otseselt kokku vihmaveega (niiskem olukord), siis on sellel betooni kestvust silmas pidades positiivsem mõju kui täielikult kuival keskkonnal. Sama vesitsementteguritega betoonidel on keskkonnaklasside XC3 ja XC4 korral karboniseerumissügavuste vahe peaaegu kahekordne.



Joonis 3.5 Karboniseerumissügavuse  $x_c(t_{SL})$  sõltuvus projekteeritud kasutuseast  $t_{SL}$ , keskkonnaklassist ja vesitsementtegurist

Tabelis 3.2 on esitatud keskkonnaklasside XC3 ja XC4 korral kehtivate standardite järgsed kaitsekihtide paksused projekteeritud kasutusigadele 50 ja 100 aastat. Klass XC3 eeldab esimese juhul 35 mm ja 45 mm paksuseid kaitsekihte, XC4 vastavalt 40 mm ja 50 mm. Kõik need väärtused jäävad kõrgemaks joonisel 3.5 esitatud karboniseerumissügavustest. Vesitsementteguri  $w/c = 0,40$  korral on XC3 kaitsekihtide väärtused  $t_{SL} = 50$  aastat puhul ca 2,4 korda suurem karboniseerumissügavusest ning  $t_{SL} = 100$  aastat juba ca 4,1 korda suurem. Keskkonnaklassi XC4 korral on samad kordajad vastavalt 9,5 ja 8,9.

Eelnevale infole tuginedes järeldub, et hetkel kasutatavad standardid ülehindavad karboniseerumise sügavust betoonis kaasaegsete tsemendisegude puhul. Enne mudeli kasutuselevõttu tuleks Eesti tingimustes viia läbi täiendavad katsed karboniseerumise mõju hindamiseks, et mudeli ja lähteandmete sobivust hinnata.

### 3.3 Kloriididest põhjustatud korrosiooni mudeli analüüs

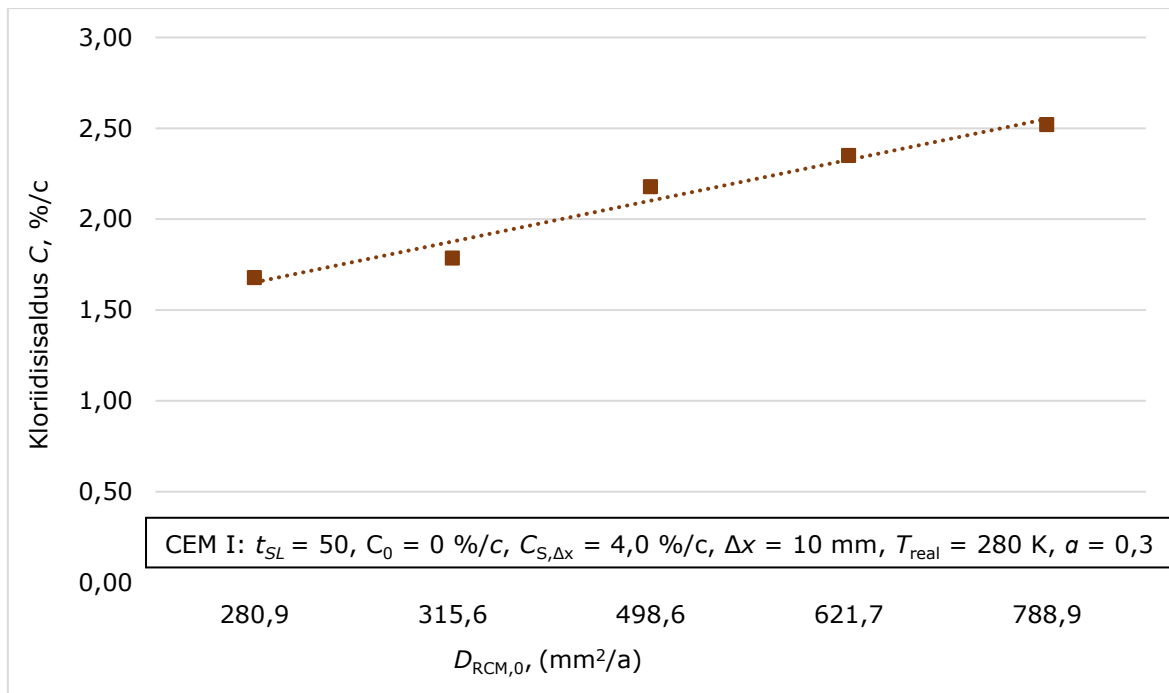
Peatükis 2.3 tutvustati ja selgitati kloriididest põhjustatud korrosiooni mudelis sisalduvaid tegureid ja nende mõju lõplikule betooni kloriidisisaldusele. Antud töös katsetatakse toimivuspõhist mudelit ka Pärnu kesklinna silla tekiplaadi projekteerimiseks. Koondatud sisendandmed on esitatud tabelis 3.4.

Tabel 3.4 Kloriididest põhjustatud korrosiooni mudeli lähteandmed

| Parameeter       | Kirjeldus                                      | Ühik                                 | Jaotus                 | Keskvärtus, $\mu$ | Standardhälve, $\sigma$ | a    | b   |   |   |
|------------------|--|--------------------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|------|-----|---|---|
| $D_{APP}(t)$     | $D_{RCM,0}$                                    | Kloriidi migratsioonikoefitsent      | mm <sup>2</sup> /a     | Normaal           | Tabel 2.7               | -    | -   | - |   |
|                  | $\alpha$                                       | Vananemise eksponent                 | -                      | Beeta             | Tabel 2.8 ja 2.9        | 0,12 | 0   | 1 |   |
|                  | $t_0$  | Referentsaeg                         | aastat                 | Konstant          | 0,0767                  | -    | -   | - |   |
|                  | $k_e$  | $b_e$                                | Temperatuurikoefitsent | K                 | Normaal                 | 4800 | 700 | - | - |
|                  |  | $T_{ref}$                            | Referentstemperatuur   | K                 | Konstant                | 293  | -   | - | - |
| $T_{real}$       |  | Konstruktsiooni elemendi temperatuur | K                      | Normaal           | 280 (Ptk 2.3.5)         | -    | -   | - |   |
| $C_{S,\Delta x}$ | Kloriidisisaldus sügavusel $\Delta x$ ajal $t$ | %/c                                  | -                      | 4,0 (Tabel 2.10)  | -                       | -    | -   |   |   |
| $\Delta x$       | Konvektsioonitsooni sügavus                    | mm                                   | Beeta                  | 10 (Tabel 2.11)   | 5                       | 0    | 50  |   |   |
| $C_0$            | Esiagne kloriidisisaldus betoonis              | %/c                                  | Konstant               | 0 / Tabel 2.6     | -                       | -    | -   |   |   |
| $C_{crit}$       | Kriitiline kloriidisisaldus                    | %/c                                  | Beeta                  | 0,6               | 0,15                    | 0,2  | 2,0 |   |   |
| $a$              | Betooni kaitsekiht                             | mm                                   | Normaal                | 10                | -                       | -    | -   |   |   |

Sarnaselt karboniseerumismudelile on ka käesoleva mudeli puhul võimalik lähteandmetena kasutada piirkonnale omaseid ilmaandmeid – antud juhul konstruktsiooni ümbritsevat õhutemperatuuri, mille mõju arvestab difusiooni temperatuurisõltuvuse parameeter  $k_e$ . Keskkonnaklassi valikust sõltub konvektsioonitsooni sügavus  $\Delta x$  ning sellega seotud kloriidisisaldus  $C_{S,\Delta x}$ . Kloriidi migratsioonikoefitsent  $D_{RCM,0}$  ning vananemise eksponent  $\alpha$  sõltuvad valitavast tsemendisegust. Tegurite väärtused tuleks leida kõikide piirkonnas kasutatavate tsemendisegude kohta, et oleks võimalik leida optimaalseim variant kestva betooni projekteerimiseks.

Joonisel 3.6 on näidatud kloriidisisalduse  $C$  profiili sõltuvus kloriidi migratsioonikoefitsendist  $D_{RCM,0}$  vastavalt tsemendi tüübile CEM I ja vesitsementtegurile  $w/c = 0,40 - 0,60$ . Antud graafikust järeldub, et kloriidisisalduse profiili kasv on vesitsementteguri kasvades lineaarne.

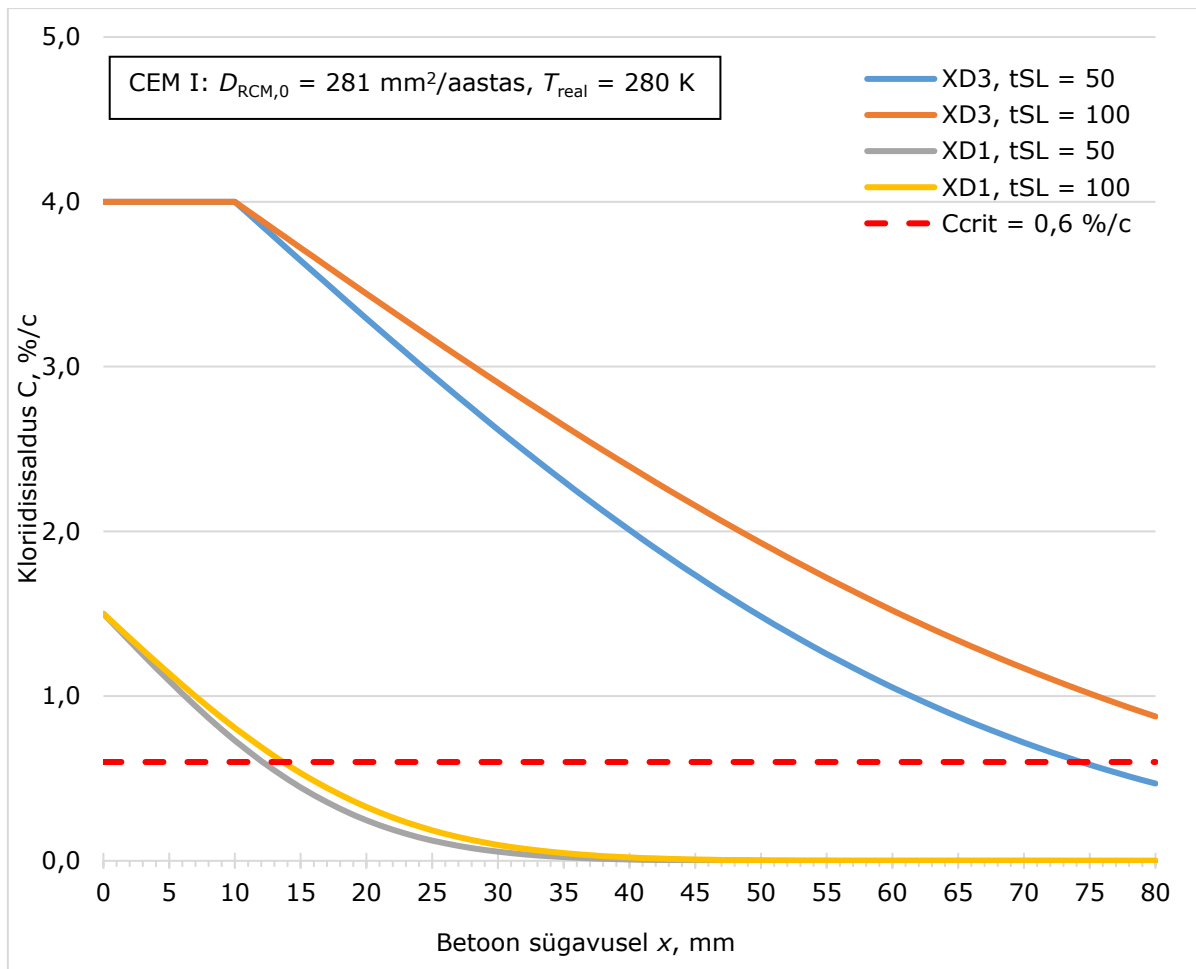


Joonis 3.6 Kloriidisisalduse C profiili sõltuvus kloriidi migratsioonikoefitsendist  $D_{RCM,0}$

Mudeli abil leitud eeldatavad kloriidisisalduse C profiilid on esitatud joonisel 3.7. Projekteeritud kasutusigadele 50 ja 100 aastat on loodud graafikud keskkonnaklasside XD1 ja XD3 korral. Lähteandmed erinevate keskkonnatingimuste puhul on täpsustatud tabelite 2.10 ja 2.11 abil. XD1 eeldab konvektsioonitsooni sügavust  $\Delta x = 0$  mm,  $C_{S,\Delta x} = 1,5$  %/c ja vananemise tegur  $\alpha = 0,65$ , XD3 puhul  $\Delta x = 10$  mm,  $C_{S,\Delta x} = 4,0$  %/c ja vananemise tegur  $\alpha = 0,3$ . Kloriidisisalduse  $C_{S,\Delta x}$  puhul eeldatakse mudeli katsetamisel antud töös suurimat võimalikku keskvaärtust, sest väärtus sõltub suurel määral teesoolade kasutamise tihedusest ja hulgast. Kuna soolatamise hulk on vastavalt ilmastikutingimustele ajas muutuv, tuleks selle mõju ja teguri väärtusi järgnevate uurimistööde käigus täpsustada.

Keskkonnaklassi XD1 korral on kloriidiprofiil kasutusigade 50 ja 100 aastal puhul üpris sarnane - minimaalseid erinevusi esineb kuni 35 mm sügavuseni. Kriitiline kloriidisisaldus  $C_{crit}$  on ületatud alla 13 - 14 mm sügavusel betoonis mõlema kasutusea korral, mis on oodatavad tulemus, kuna betoon puutub kokku ainult kloriide sisaldavate piiskadega.

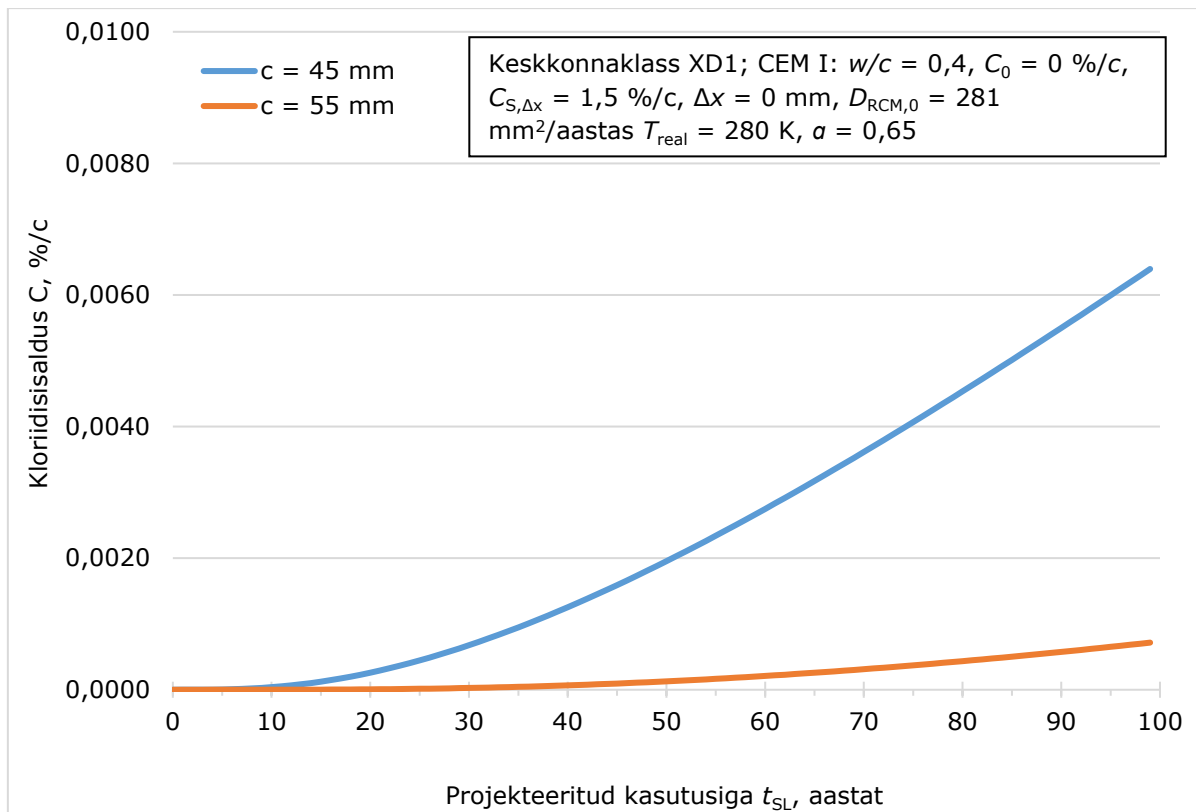
Keskkonnaklass XD3 on raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse kohapealt palju raskem, olles mõlema kasutusea puhul üle kriitilise kloriidisisalduse piirväärtuse isegi 60 mm sügavusel betoonis. 50-aastase kasutusea korral jõuab kloriidiprofiil  $C_{crit} = 0,6$  %/c väärtuseni sügavusel 74 mm. 100 aasta puhul jääb isegi 80 mm juures väärtus kriitilisest piirist kõrgemaks.



Joonis 3.7 Kloriidisisalduse C profiil betoonis sügavustel x

Joonisel 3.8 ja 3.9 on kujutatud kloriidisisalduse C profiili sõltuvalt projekteeritud kasutuseast keskkonnaklasside XD1 ja XD3 korral. Betooni kaitsekihi paksustena on kasutatud tabelis 3.2 määratud kaitsekihi paksusi, mis on leitud kasutades kehtivate standardite meetodikat.

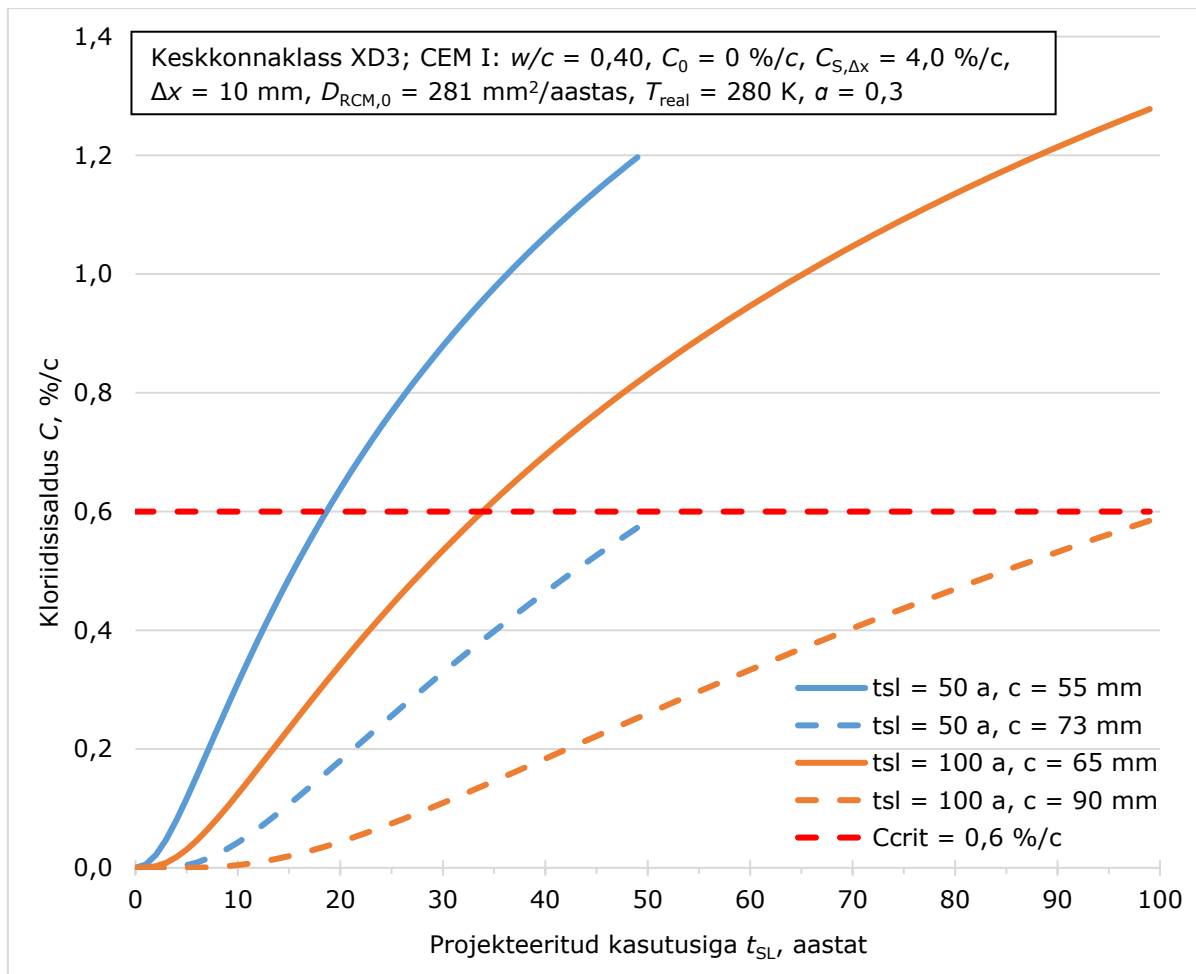
Keskkonnaklassi XD1 puhul ei jõua 50-aastase kasutusea puhul soovitatud 45 mm kaitsekihi korral kui 100 aasta 55 mm puhul kloriidiprofiil C kloriidide kriitilisele sisalduse piirväärtusele isegi lähedale. Antud juhul on põhjuseks mudelis kasutatav madal vesitsementtegur  $w/c = 0,40$ .



Joonis 3.8 Kloriidisisalduse  $C$  profiil sõltuvalt projekteeritud kasutuseast  $t_{SL}$ , keskkonnaklass XD1

Keskkonnaklassi XD3 korral ületab kloriidiprofiil  $C$  kloriidide kriitilise sisalduse piirväärtuse  $C_{crit} = 0,6$  %/c juba enne projekteeritud kasutusea lõppu. Betooni kaitsekihi 55 mm korral, kui kasutuseana eeldatakse 50 aastat, on kriitiline piir ületatud juba esimese 20 aasta möödudes. 100-aastase kasutusea ja 65 mm kaitsekihi puhul on eeldatav aeg 35 aastat, kuni kloriidide sisaldus kaitsekihi sügavusel ületab kriitilise piiri.

Katsetades mudelit joonisel 3.9 esitatud sisendandmetel, peaks projekteeritav betooni kaitsekihi paksus olema 50-aastase kasutusea korral 73 mm ja 100 aasta puhul 90 mm, et kloriidide sisaldus ei ületaks antud kaugustel kriitilist piirväärtust. Enamikel juhtudel on nii suurte kaitsekihtide rakendamine aga ebamõistlik, mistõttu tuleks kaaluda lisandeid sisaldavate tsemendisegude kasutamist, mis tagavad betoonile pikema kestvuse.



Joonis 3.9 Kloriidisisalduse  $C$  profiil sõltuvalt projekteeritud kasutuseast  $t_{SL}$ , keskkonnaklass XD3

Uute konstruktsioonide projekteerimisel tuleks parameetrid  $C_{S,\Delta x}$ ,  $C_0$ ,  $a$  ja  $D_{app}$  tuletada olemasolevatest konstruktsioonidest, mille betooni koostis, teostus ja keskkonnatingimused on sarnased uue rajatise omadele [33]. Eesti tingimustes tuleks erinevaid tsemendisegusid katsetada, et leida meie kliima jaoks optimaalseim lahendus. Lisaks tuleks uurida teehoolduses kasutatavate teesoolade mõju betoonkonstruktsioonide kestvusele, pidades silmas just kloriidisisaldust betoonis.



## KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli kehtivate õigusaktide järgne konstruktsiooni kestvuse hindamise tutvustamine, antud meetodite puuduste väljatoomine ning uue toimivuspõhisel lähenemisel põhineva konstruktsioonide projekteerimise tutvustamine ja analüüsimine. Töös on esitatud teoreetiline ülevaade betoonkonstruktsioonide projekteerimise standarditest, kus kestvust käsitletakse. Praktilise väljundina on osutatud kehtivate nõuete puudustele ning tutvustatud ja analüüsitud toimivuspõhiseid mudeleid kestvuse hindamiseks.

Kestva konstruktsiooni projekteerimisprotsess keskendub hetkel ümbritseva keskkonna korrektsele hindamisele ja lähteandemete valikule. Projekteerimisfaasis on võimalik betoonkonstruktsiooni kestvusnõudeid rahuldada, valides asjakohased keskkonnaklassid ning nõuetele vastav minimaalne betoonikaitsekiht. Kehtivatel standarditel esineb mitmeid puudusi, mis seavad kahtluse alla nendes täpsustatud andemete kaasaegsuse tänapäeva muutuvates keskkonnatingimustest. Juhendid kasutavad ettekirjutavat (*prescriptive*) lähenemist, andes ette erinevate tegurite piirväärtused, mis peaks valitud keskkonnas tagama kestva betoonkonstruktsiooni. Eelkirjeldatud lähenemine eeldab, et kõik materjalid, näiteks tsemendisegud, toimivad ühtemoodi. Aja jooksul on muutunud kasutatavate tsementide ja lisandite tüübid ja nende mõju betooni kestvusele tuleks uurida iga konkreetse keskkonna korral, kuhu betoonkonstruktsioon rajatakse. Lisaks eelnevale tuleks loobuda vesitsementteguri ja minimaalse tsemendisalduse piirväärtuste ettekirjutamisest ning seada lõppeesmärgiks projekteeritud kasutusea jooksul kestev betoonkonstruktsioon, mida on võimalik tagada hinnates betooni enda vastupanu ning kasutades toimivuspõhiseid näitajaid.

Töös analüüsiti uusi toimivuspõhiseid mudeleid ning täpsustati nende lähteandmeid. Mudeleid katsetati Pärnu kesklinna silla uue raudbetoonist tekiplaati projekteerimise näitel. Kõikide sisendandmete määramisel arvestati Pärnu piirkonna meteoroloogiliste iseärasustega ning hetkel Eesti tingimustes võimalike kasutatavate tsemendisegudega. Mudeli mitmed tegurid arvestavad otseselt kohaliku keskkonna mõju betoonile (õhuniiskus, temperatuur, CO<sub>2</sub> kontsentratsioon õhus). See võimaldab uue lähenemise kasutamist muutuvates keskkonnatingimustes, kui on teada antud piirkonna ilmastikuandmed.

Toimivuspõhist lähenemist uurides selgus, et hetkel on kirjanduses vähe andmeid mudelite oluliste sisendandmete määramiseks, nagu näiteks betooni karbonisatsioonikindluse pöördväärtus  $R_{ACC,0-1}$  ning kloriidi migratsioonikoefitsient  $D_{RCM,0}$ .

Magistritöös soovitatakse enne mudelite kasutuselevõttu katsetada meie piirkonnas enim kasutatavaid betoonisegusid ning täpsustada betooni vastupanu iseloomustavaid sisendandmeid. Eestis on avaldatud eelnimetatud tegurite katsetamiseks mitmeid standardeid, mille sobivust mudeleid kirjeldava FIB34 sisalduva katsemetoodikaga tuleb täiendavalt kontrollida.

Magistritöö kolmandas peatükis analüüsiti mudelite tulemusi, sealhulgas mudeli tegurite mõju lõpptulemusele ning võrreldi saadud tulemusi kehtivate standardite järgselt Pärnu kesklinna silla tekiplaadi projekteerimisel saadud betooni kaitsekihtide väärtustega.

Karboniseerumismudeli tegurite katsetamisel järeldus, et keskkonna suhtelisel õhuniiskusel on suur mõju karboniseerumissügavusele, mis erineb niiskuste 60 % ja 95 % puhul neljakordselt. Samuti on suur mõju betooni kestvusele betooni järelhooldusel, eriti esimesel 7 päeval, millal on võimalik saavutada 40 % väiksem mõju lõplikule karboniseerumissügavusele. Lisaks eelnevale on mudeli lõpptulemusele suure kaaluga mõju hoovihma tõenäosuse teguri  $p_{SR}$  väärtuse valikul.

Täpsustatud tegurite väärtusi kasutades leiti lõplik betooni karboniseerumissügavus keskkonnaklasside XC3 ja XC4 ning kasutusigade 50 ja 100 aastat korral. Tulemustest järeldus, et võrreldes kehtivate standardite järgsete kaitsekihtidega on mudelist saadavad karboniseerumissügavused keskkonnaklassi XC3 ja projekteeritud kasutusea 50 aastat korral 2,4 korda ja 100 aasta korral 4,1 korda väiksemad, kui standardite järgsed nõutavad kaitsekihid. XC4 puhul on samad kordajad vastavalt 9,5 ja 8,9. Järeldub, et praegune lähenemine ülehindab karboniseerumise sügavust betoonis. Lisaks on näha, et keskkonnaklassi XC3 korral on oodata suuremaid karboniseerumissügavusi kui XC4 korral, kuigi nõutavad minimaalsed kaitsekihid on väiksemad.

Kloriididest põhjustatud korrosiooni mudelil on oluline enne kasutuselevõttu täpsustada kriitilisi väärtusi, mis määravad armeeritud betooni kasutusea lõpu. Tegureid nagu kloriidisisaldus  $C_{S,\Delta x}$ , esialgne kloriidisisaldus  $C_0$  ja ka kriitiline kloriidisisaldus  $C_{crit}$  tuleks lähemalt uurida, eriti keskkonnas, kus betooni kestvust mõjutavad teehooldusel kasutatavad soolad. Keskkonnaklassi XD3 korral järeldus mudelist, et projekteerides betooni tsemendi CEM I ja vesitsementteguriga  $w/c = 0,40$ , on Pärnu tingimustes nõutavad betooni kaitsekihid 73 mm ja 90 mm, et tagada projekteeritud kasutusigadid 50 ja 100 aastat. Hetkel kehtivate standardite kohaseid kaitsekihte kasutades oleks kriitiline kloriidisisalduse piir ületatud 50 aastase kasutusea korral 20 aasta möödudes ning 100 aasta korral 35 aasta möödudes.

Analüüsist järeldus, et mudelites sisalduvatel teguritel on väga erineva kaaluga mõju. Karboniseerumismudeli tulemused näitasid, et praegusel lähenemisel on betooni minimaalsed kaitsekihid palju suuremad, kui tegeliku konstruktsiooni karboniseerumissügavused. Kloriididest põhjustatud korrosiooni mudelist selgus, et hetkel nõutavad kaitsekihid ei taga projekteeritud kasutuseale vastavat kestvust, kuna kloriidid jõuavad armatuurini enne kasutusea lõppu.

Enne toimivuspõhise lähenemise kasutuselevõttu tuleks mudelite lähteandmeid lähemalt uurida, enim kasutatavaid tsemendisegusid ja lisandeid tuleks katsetada, et leida optimaalseim lahendus kestva betoonkonstruktsiooni ehitamiseks. Täiendavalt võiks uurida karboniseerumise ja kloriidide koosmõju betooni kestvusele.

## SUMMARY

The purpose of this master thesis was to present the assessment of the durability of construction in accordance with the current legislation, to highlight the shortcomings of these methods and to present and analyse the design of constructions based on a new performance-based approach. The work provides a theoretical overview of the standards for the design of concrete structures, where durability is discussed. As a practical output, shortcomings in the existing requirements have been identified and performance-based models have been presented and analysed for the assessment of durability.

The design process for durable structure currently focuses on the correct assessment of the surrounding environment and the selection of input data. During the design phase, it is possible to satisfy the durability requirements of the concrete structure by selecting the appropriate environmental classes and the appropriate minimum concrete cover. The current standards have a number of shortcomings that call into question the modernity of the data specified in them in today's changing environmental conditions. The guidelines use a prescriptive approach, providing limit values for various factors that should ensure a durable concrete structure in the chosen environment. The approach described above requires that all materials, such as cement mixtures, function in the same way. Over time, the types of cements and admixtures used have changed and their impact on the durability of concrete should be investigated for each specific environment in which the concrete structure is to be built. In addition, the provision of limit values for the water-cement ratio and minimum cement content should be waived and the ultimate goal should be a concrete structure that lasts during the designed service life, which can be ensured by assessing the concrete's own resistance and using performance-based indicators.

The work analysed new performance-based models and specified their source data. The models were tested on the example of the design of a new reinforced concrete deck slab for the Pärnu city centre bridge. All input data were determined taking into account the meteorological characteristics of the Pärnu region and the cement mixtures currently used in Estonian conditions. Several factors of the model directly take into account the impact of the local environment on concrete (humidity, temperature, concentration of CO<sub>2</sub> in the air). This will allow the new approach to be used in changing environmental conditions when weather data for the area is known.

When studying the performance-based approach, it was found that there is currently little data in the literature to determine the important input data of models, such as the inverse carbonation resistance  $R_{ACC,0-1}$  and the chloride migration coefficient  $D_{RCM,0}$ . The master's thesis recommends testing the most commonly used concrete mixtures in our area and specifying input data that characterise concrete resistance before using the models. In Estonia, several standards have been published for testing the aforementioned factors, the compatibility of which with the test methodology contained in FIB34 describing the models needs to be further verified.

In the third chapter of the master's thesis, the results of the models were analyzed, including the effect of model factors on the final result, and the obtained results were compared with the values of concrete protection layers obtained by designing the deck slab of Pärnu city center bridge according to current standards.

When testing the factors of the carbonation model, it was concluded that the relative humidity of the environment has a large effect on the depth of carbonation, which differs fourfold at 60 % and 95 % humidity. There is also a large effect on the durability of the concrete in the curing of the concrete, especially in the first 7 days, when a 40 % less effect on the final depth of carbonation can be achieved. In addition to the above, the final result of the model is heavily influenced by the choice of the  $p_{SR}$  value.

Using the values of the specified factors, the final carbonation depth of the concrete was found for environmental classes XC3 and XC4 and service life of 50 and 100 years. The results concluded that the carbonation depths of the model for environmental class XC3 and the design service life of 50 years are 2.4 times lower than the required concrete cover according to the current standards and 4.1 times lower for service life of 100 years. For XC4, the same coefficients are 9.5 and 8.9, respectively. It is concluded that the current approach overestimates the depth of carbonation in concrete. In addition, it can be seen that higher carbonation depths are expected for environmental class XC3 than for XC4, although the minimum concrete cover are lower.

In the chloride induced corrosion model, it is important to specify the critical values that determine the end of service life of reinforced concrete before commissioning. Factors such as chloride content  $C_{S, \Delta x}$ , initial chloride content  $C_0$  as well as critical chloride content  $C_{crit}$  should be further investigated, especially in environments where the durability of concrete is affected by road maintenance salts. In the case of environmental class XD3, the conclusion from the model is that when designing concrete with cement CEM I and water cement factor  $w / c = 0.40$ , concrete cover of 73 mm and 90 mm are required in

Pärnu conditions to ensure the designed service life of 50 and 100 years. Using covers according to current standards, the critical chloride limit would have been exceeded after 20 years of service life at 50 years and at 35 years for 100 years.

The analysis concluded that the factors included in the models have very different weights. The results of the carbonation model showed that in the current approach, the minimum protective layers of concrete are much larger than the carbonation depths of the actual structure. The chloride induced corrosion model showed that the currently required protective layers do not ensure the durability corresponding to the designed service life, as the chlorides reach the reinforcement before the end of the service life.

Before adopting the performance-based approach, the initial data of the models should be studied in more detail, the most commonly used cement mixtures and admixtures should be tested in order to find the most optimal solution for the construction of a durable concrete structure. The combined effect of carbonation and chlorides on the durability of concrete could be further investigated.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Alexander, Mark G. "Durability and Service Life Prediction for Concrete Structures – Developments and Challenges." *MATEC Web of Conferences*, edited by A. Diouri et al., vol. 149, 2018, doi:10.1051/mateconf/201814901006.
- [2] Peck, Martin, editor. *Concrete: Design, Construction, Examples*. Birkhäuser; Edition Detail, 2006.
- [3] Wiederhold, Gio. "FUTURE NEEDS IN INTEGRATION OF INFORMATION." *International Journal of Cooperative Information Systems*, vol. 09, no. 04, Dec. 2000, doi:10.1142/S0218843000000211.
- [4] Hussey, Stephen, and Paul Thompson, editors. *The Roots of Environmental Consciousness: Popular Tradition and Personal Experience*. Routledge, 2000.
- [5] ES ISO 13823:2012(E), General principles on the design of structures for durability.
- [6] Uustalu, Enn, *Betooni pragunemine*, Ehitaja 6(59) 2001.
- [7] Eesti Standardikeskus, "EUROKOODEKS Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused" EVS\_EN 1990:2002, 2003.
- [8] Eesti Standardikeskus, "EUROKOODEKS 2: BETOONKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonetele" EVS\_EN 1992-1-1:2005+A1:2015+NA:2015, 2015.
- [9] Demis, Sotiris, and Vagelis G. Papadakis. "Durability Design Process of Reinforced Concrete Structures - Service Life Estimation, Problems and Perspectives." *Journal of Building Engineering*, vol. 26, Nov. 2019, doi:10.1016/j.job.2019.100876.
- [10] *SHRP 2 Project Brief: Designing Bridges for Service Life | Blurbs New | Blurbs | Publications*, 2013, <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/169413.aspx>.
- [11] Õiger, Karl, „Õppematerjal, Hoonete ja ehitiste renoveerimine" Tallinna Tehnikaülikool, BuildEst II, 2016.
- [12] Torrent, Roberto J. "Bridge Durability Design after EN Standards: Present and Future." *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 15, no. 7, July 2019, doi:10.1080/15732479.2017.1414859.
- [13] Alexander, Mark G. "Durability and Service Life Prediction for Concrete Structures – Developments and Challenges." *MATEC Web of Conferences*, edited by A. Diouri et al., vol. 149, 2018, doi:10.1051/mateconf/201814901006.
- [14] Eesti Standardikeskus, "Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus" EVS-EN 206:2014+A1:2016, 2016.
- [15] Alexander, Mark Gavin. "Service Life Design and Modelling of Concrete Structures – Background, Developments, and Implementation." *Revista ALCONPAT*, vol. 8, no. 3, Aug. 2018, doi:10.21041/ra.v8i3.325.

- [16] Torrent, Roberto J. "Bridge Durability Design after EN Standards: Present and Future." *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 15, no. 7, pp. 886–98, doi:10.1080/15732479.2017.1414859.
- [17] International Federation for Structural Concrete, editor. *Model Code 2010: First Complete Draft. Vol. 1: ...* International Federation for Structural Concrete, 2010.
- [18] Teplý, Břetislav, et al. "Durability Assessment of Concrete Structures: Reinforcement Depassivation Due to Carbonation." *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 317–27, doi:10.1080/15732470701511550.
- [19] ISO 16204:2012(E), Durability – Service life design of concrete structures.
- [20] Schiessl, Peter, et al. *Fib Bulletin 34. Model Code for Service Life Design*. Edited by fib. The International Federation for Structural Concrete, fib. The International Federation for Structural Concrete, 2006, doi:10.35789/fib.BULL.0034.
- [21] M. Luković, I. Ignjatović, Application of carbonation model for service life design to serbian environmental conditions and engineering practice, International Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites, and Guang Ye, editors. *Microstructural-Related Durability of Cementitious Composites: Amsterdam, the Netherlands, 11-13 April 2012*.
- [22] von Greve-Dierfeld, Stefanie, and Christoph Gehlen. "Performance-Based Durability Design, Carbonation, Part 3: PSF Approach and a Proposal for the Revision of Deemed-to-Satisfy Rules." *Structural Concrete*, vol. 17, no. 5, Dec. 2016, doi:10.1002/suco.201600085.
- [23] Riigi Ilmateenistus, <http://www.ilmateenistus.ee/>
- [24] von Greve-Dierfeld, Stefanie, and Christoph Gehlen. "Performance Based Durability Design, Carbonation Part 1 - Benchmarking of European Present Design Rules." *Structural Concrete*, vol. 17, no. 3, Sept. 2016, doi:10.1002/suco.201600066.
- [25] Eesti Standardikeskus, "Betoonstruktsioonide ehitamine" EVS-EN 13670:2010, 2010.
- [26] Büns, Christian, and Wilhelm Kuttler. "Path-Integrated Measurements of Carbon Dioxide in the Urban Canopy Layer." *Atmospheric Environment*, vol. 46, Jan. 2012, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.09.077.
- [27] Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>.



- [28] Song, Ha-Won, et al. "Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 5, May 2006, doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.019.
- [29] R. He, A Study on Carbonation for Low Calcium Fly Ash Concrete under Different Temperature and Relative Humidity, *Electron. J. Geotech. Eng.* 15 (2010) 1871–1877. <http://www.ejge.com/2010/Ppr10.137/Ppr10.137.pdf>.
- [30] Persidski, Rauno. *Raudbetooni kloriidikindluse uurimine tegevusklassi ja betoonilisandi näitel*. 2015. [dspace.emu.ee](http://dspace.emu.ee), <http://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/2334>.
- [31] *Fib Bulletins No. 76: Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards*. <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/benchmarking-of-deemed-to-satisfy-provisions-in-standards-detail.html>.
- [32] Zambon, Ivan, et al. "Prediction of the Remaining Service Life of Existing Concrete Bridges in Infrastructural Networks Based on Carbonation and Chloride Ingress." *Smart Structures and Systems*, vol. 21, no. 3, Mar. 2018, doi:10.12989/SSS.2018.21.3.305.
- [33] Helland, Steinar. "Service Life Design of Concrete Structures: The Limit State and Reliability-Based Approach given in Fib MC SLD and ISO 16204." *International Journal of Structural Engineering*, vol. 4, no. 1/2, 2013, doi:10.1504/IJSTRUCTE.2013.050761.
- [34] Eesti Standardikeskus, "EUROKOODEKS 2: BETOONKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMINE Osa 2: Betoonsillad. Arvutus- ja konstrueerimisreeglid" EVS-EN 1992-2:2005+NA:2008, 2008.
- [35] Selektor Projekt OÜ, „Pärnu kesklinna silla laiendamine ja rekonstrueerimine“, 2021
- [36] Eesti Standardikeskus, "Testing hardened concrete - Part 10: Determination of the carbonation resistance of concrete at atmospheric levels of carbon dioxide " EVS-EN 12390-10:2018, 2019.
- [37] Eesti Standardikeskus, "Testing of concrete -- Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete -- Accelerated carbonation method" ISO 1920-12:2015, 2015.
- [38] Bertolini, L., Elsener, B., Pedefferri, P., Polder, R. „Corrosion of Steel in Concrete – Prevention, Diagnoses, Repair“. Weinheim: Wiley-VCH. 392 pp, 2005.
- [39] Angst, U. & Vennesland, Ø . „Critical chloride content in reinforced concrete – State of the art. – Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II“, 2008.

- [40] Eesti Standardikeskus, "Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion" EVS-EN 12390-11:2015, 2015.
- [41] Eesti Standardikeskus, "Testing hardened concrete - Part 18: Determination of the chloride migration coefficient" EVS-EN 12390-18:2021, 2021.

