



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**SOOVITUSED KLORIIDIKINDLUSE
PROGNOOSIMUDELITE VALIDEERIMISEKS
RAUDBETOONSILDADEL**

**SUGGESTIONS FOR VALIDATION OF CHLORIDE
RESISTANCE PREDICTIVE MODELS ON REINFORCED
CONCRETE BRIDGES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Germo Ilvesmets

Üliõpilaskood 204207EAXM

Juhendaja: Sander Sein, lektor

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.

25. mai 2022

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

25. mai 2022

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

25. mai 2022

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Germo Ilvesmets

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Soovitused kloriidikindluse prognoosimudelite valideerimiseks raudbetoonsildadel“, 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.

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

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

25. mai 2022

¹ 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.

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Germo Ilvesmets, 204207EAXM

Õppekava, peeriala: EAXM15/18 - Hooned ja rajatised, teede- ja sillaehitus

Juhendaja(d): Sander Sein, lektor, 53304077

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Soovitused kloriidikindluse prognoosimudelite valideerimiseks raudbetoonsildadel

(inglise keeles) Suggestions for validation of chloride resistance predictive models on reinforced concrete bridges

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida sildade kloriidide sissetungimise analüütilist mudelit
2. Uurida põhjalikult keskkonnaklassist tingitud kloriidide sissetungimist betooni
3. Uurida betooni vastupanu kloriidide sissetungimisele
4. Teostada vähemalt kolmel sillal kloriidide sissetungimise katsetamine, võrrelda tulemusi analüütilise mudeliga täpsustades prognoosimudeleid

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetilise osa kirjutamine, andmete kogumine	21.02.2022
2.	Erinevate andmete, võimalike tulemuste kokkupanemine ning analüüsi kirjutamine. Välikatsete teostamine.	20.03.2022
3.	Tulemuste analüüs ning sidumine kirjandusega	11.04.2022
4.	95% valmis, lõputöö kaitsmistaotluse esitamine	09.05.2022
5.	Töö valmis, töö esitamine retsenseerimiseks	25.05.2022

Töö keel: EESTI **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: Germo Ilvesmets ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Sander Sein ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: Simo Ilomets ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1. Raudbetoon ja terasarmatuuri korrosioon	10
1.1 Betoon ja selle vastupanu kloriidide sisse tungimisele	10
1.1.1 Keskkonnaklassid	11
1.1.2 Orienteeruvad tugevusklassid kestvuse tagamiseks	12
1.1.3 Betoonkaitsekihi määramine	12
1.1.4 Betooni omaduste soovitatavad piirväärtused	14
1.2 Kloriidide sissetungimine betooni	16
1.2.1 Armatuurterase depassiveerimise piirseisundi võrrand pragunemata betoonile	17
1.2.2 Kriitiline kloriidisisaldus betoonis C_{crit}	17
1.2.3 Esialgne kloriidisisaldus betoonis C_0	18
1.2.4 Kloriidisisaldus betooni pinnal C_S ja sügavusel $C_{S,\Delta x}$	19
1.2.5 Armatuuri kaitsekiht C_{nom}	19
1.2.6 Konvektsiooni tsooni sügavus Δx	20
1.2.7 Kloriidi difusioonikoefitsient $D_{app,C}$	21
1.2.8 Difusiooni temperatuurisõltuvuse parameeter k_e	21
1.2.9 Kloriidi migratsioonikoefitsient $D_{RCM,0}$	23
1.2.10 Vananemise alafunktsioon $A(t)$	23
1.2.11 Projekteeritud eluiga t_{SL}	25
2. Kloriidide sissetungimise arvutusmudeli rakendamine	26
2.1 Korrosioon kloriididest keskkonnaklassis XD1	27
2.2 Korrosioon kloriididest keskkonnaklassis XD2	29
2.3 Korrosioon kloriididest keskkonnaklassis XD3	31
3. Kloriidide sissetungimise sügavuse mõõtmise välikatsed	34
3.1 Välikatsete meetodika	34
3.2 Välikatsete läbiviimine	35

3.3	Uuritavad objektid	37
3.3.1	Tõrvandi viadukt 1	37
3.3.2	Lennu viadukt	38
3.3.3	Kintsli sild	39
3.3.4	Saare sild	41
3.4	Uuritavate rajatiste eeldatavad profiilid	42
4.	Analüüs ja soovitused edaspidiseks	47
4.1	Umbsaare raudteeviadukt	47
4.1.1	Umbsaare raudteeviadukti raudbetoonkonstruktsioonide uuring	48
4.1.2	Lähteandmed	51
4.2	Umbsaare viadukti mõõtetulemuste analüüs	53
4.3	Soovitused edaspidiseks	58
	KOKKUVÕTE	60
	SUMMARY	63
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	66
	LISAD	69
	Lisa 1 Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama keskmine õhutemperatuur (°C) 2004-2021 [30]	69
	Lisa 2. Transpordiameti kooskõlastus sildade puurimiseks	70
	Lisa 3. Sildade puuraukude sügavused	71

EESSÕNA

Magistritöö pealkiri on „Soovitused kloriidikindluse prognoosimudelite valideerimiseks raudbetoonsildadel“.

Magistritöö koostamiseks pakkus juhendaja Sander Sein esialgu välja viis erinevat teemat/probleemi, millest ühise arutelu käigus tehti lõplik valik. Magistritöö eesmärgiks on jätkata Jörgen Vanamõisa Tallinna Tehnikaülikooli magistritöös „Raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse hindamine toimivuspõhiste mudelitega“ tutvustatud toimivuspõhist lähenemist, keskendudes prognoosimudelite täpsustamise eesmärgil betooni kloriidikindlusele.

Töö koostati peamiselt Tartus. Magistritöö algandmete kogumisel olid abiks juhendaja Sander Sein ja Transpordiameti Lõuna üksuse sillainsener Priit Veeroja.

Täna kõiki, kes töö valmimisele kaasa aitasid. Väga hea suunamise, kaasa mõtlemise ja väga suure abi eest juhendajat Sander Seina. Transpordiameti Lõuna üksuse sillainseneri Priit Veeroja, kes aitas katsetamiseks sildade valikul ja projektide ning täitedokumentatsiooniga. Tallinna Tehnikakõrgkooli õppeprorektorit Martti Kiisat, kes tegi kõik, et laborikatsetused saaks teostatud ja kehvema stsenaariumi jõustumisel, aitas leida varasemaid sillauuringuid, kus oli kloriide katsetatud. Tööandjat Esprii OÜ võimaluse eest töö kõrvalt õpingute ja magistritööga tegeleda. Oma abikaasat, kes rasketel hetkedel aitas leida motivatsiooni ja innustas magistritööga tegelema ning vajadusel tegeles rohkem lastega, et autor saaks töö tähtajaks valmis.

Võtmesõnad: raudbetoon, kestvus, prognoosimudel, kloriidikindlus, magistritöö.

SISSEJUHATUS

Raudbetoon on tänapäeval üks tähtsamaid ehitusmaterjale, mis leiab kasutust erinevates ehitusvaldkondades. Seda kasutatakse erinevate mastaapsusega hoonete rajamisel, samuti sildade kui ka maanteedehitamiseks. Raudbetooni lihtsus ja vastupidavus annab piiramatu kasutusvõimalusi.

Vaatamata asjaolule, et tegemist on vastupidava materjaliga võivad kokkupuuted raskete keskkonnatingimustega nagu temperatuur, niiskus, jääsulatusained, kloriidid ja sulfaadid seda nõrgestada [7]. Kui raudbetoonkonstruktsioonid puutuvad kokku kloriidide sisaldava keskkonnaga, peab betoon olema piisavalt vastupidav kloriidide sissetungimisele. Kloriidid lõhuvad ära terasest armatuuri oksiidse kaitsekihi, millega nad loovad soodsad tingimused armatuuri korrosiooni protsessi tekke alguseks [1].

Käesoleva magistritöö eesmärgid on:

- Uurida sildade kloriidide sissetungimise analüütilist mudelit.
- Põhjalikult uurida keskkonnaklassist tingitud kloriidide sissetungimist betooni ja betooni vastupanu kloriidide sissetungimisele.
- Viia läbi sildadel kloriidide sissetungimise uuringuid. Võrrelda tulemusi analüütilise mudeliga ja tulenevalt tulemustest täpsustada prognoosimudeleid, mis võimaldaks tulevikus sildade kestvust täpsemini hinnata.

Magistritöö on jagatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade raudbetoonist ja terasarmatuuri korrosioonist. Tutvustatakse kloriididest tingitud keskkonnaklasse, betoonkaitsekihi määramist ja betooni soovitavaid piirväärtuseid tulenevalt keskkonnaklassist ja standardite soovitustest. Samuti tutvustatakse kloriidide sissetungimissügavuse prognoosimudelit ja selle elemente vastavalt Rahvusvahelise konstruktsioonibetonide föderatsiooni (fib) poolt avaldatud juhiste fib väljaanne 34 [2] ja fib väljaanne 76 [3].

Teises peatükis uuritakse kloriidide liikumist betoonis keskkonnaklasside XD1, XD2 ja XD3 korral. Lähteandmete määramisel on arvestatud Tartu piirkonna meteoroloogiliste tingimustega. Kuna sillad projekteeritakse üldjuhul 100 aastase kestvusega, siis kasutati mudeli arvutustest sama väärtust. Prognoosid kloriidide liikumise kohta betoonis tehti kõigi tsementide kohta, mille kohta oli FIB76-s [3] andmed olemas nii vananemise eksponendi kui ka kloriidi migratsioonikoefitsiendi kohta.

Kolmandas peatükis uuritakse nelja Lõuna – Eesti silda: Tõrvandi viadukt 1, Lennu viadukt, Kintsli sild ja Saare sild. Objektide valikukriteeriumiteks said teeklass, rajatise vanus ja rajatise paiknemine soolatataval teel. Lisaks tutvustatakse välikatsete meetodikat ja läbiviimist ning koostatakse vastavalt projekt- ja täitedokumentatsioonile rajatiste eeldatavad kloriidisisalduse profiilid.

Esiolgselt oli plaanitud neljandas peatükis analüüsida uuritud sildade laboritulemusi, võrrelda tulemusi analüütilise mudeliga ja täpsustada prognoosmudelit ning arvutada välja uuritud rajatiste puhul eeldatav armatuurterase korrodeerumise aeg.

Kahjuks läks teisiti. Kuigi laborile oli tellimus tehtud juba veebruarikuus, uuritavatel rajatistel katsematerjalide kogumine ja laborisse saatmine oli töö autori poolt läbi viidud märtsi esimeses pooles, ei osanud keegi ette näha, mis mõju avaldab Venemaa 24. veebruaril alustatud sõda Ukraina vastu. 20. mai 2022 seisuga ei olnud labor veel katsetamiseks vajalikke abimaterjale Ameerika Ühendriikide tehasest kätte saanud. Seega võeti autori ja juhendaja arutelu käigus vastu otsus töö pealkirja täpsustada ja lisaks analüüsida viimases peatükis mõnda silda, millele on tehtud varasemate uuringute käigus ka kloriiduuringuid.

Selgus, et Tallinna Tehnikakõrgkool on 2015. aastal läbi viinud Umbsaare raudteeviaduktile (nr 883) raudbetoonkonstruktsioonide uuringud, mille käigus teostati piisavalt palju (kokku 20 mõõtepunktis) kloriidide sisalduse mõõtmisi betoonis. Seega analüüsitakse neljandas peatükis Umbsaare viaduktil 2015 teostatud uuringute andmeid ja nende ühtimist prognoosimudelitega. Samuti antakse soovitusi edaspidiseks kloriidikindluse prognoosimudelite valideerimiseks.

1. RAUDBETOON JA TERASARMATUURI KORROSION

1.1 Batoon ja selle vastupanu kloriidide sissetungimisele

Batoon on materjal, mis saadakse omavahel segatud tsemendist, jäme- ja peentäitematerjalist ja veest ning millele võib lisada või mitte lisada keemilisi ja peenlisandeid või kiudu ja mille omadused kujunevad tsemendi hüdratatsiooni tulemusena [4].

Betooni ja terasarmatuuri kombineerimisel saadakse komposiitmaterjal – raudbetoon. See on oma olemuselt üks ökonoomsemaid, vastupidavamaid ja esteetiliselt meeldivamaid ehitussüsteeme. Esmakordselt 19. sajandil Prantsusmaal kasutatud raudbetoon tagab suurepärase konstruktsiooni terviklikkuse pika aja jooksul suhteliselt vähese hooldusega. Betooni ja terase kombinatsioon võimaldab madalaid kulusid ja suurt ehituskiirust, muutes selle omanikele, arhitektidele ja inseneridele atraktiivseks materjaliks. [5]

Batoon ühendab inimesi kõikjal. Sellest on tehtud meie ühiskonna alustalad – sillad, raudteed, maanteed, haiglad ja koolid, tehased ja kodud. Betooni lihtsus, vastupidavus, tugevus, taskukohasus ja kasutusvõimaluste piiramatus on muutnud selle materjali tänapäeval üheks tähtsamaks ehitusmaterjaliks. [6]

Hoolimata asjaolust, et betoon on hea vastupidavusega materjal, võivad kokkupuuted raskete keskkonnatingimustega nagu temperatuur, jääsulatusained, niiskus, agressiivsed ioonid, peamiselt kloriidid ja sulfaadid, seda nõrgestada [7]. Raudbetoonkonstruktsioonid, mis puutuvad kokku keskkonnaga, mis sisaldab kloriide, peavad olema piisavalt vastupidavad kloriidide sissetungimisele [8]. Kloriidid lõhuvad ära terasest armatuuri oksiidse kaitsekihi (Fe_2O_3), millega nad loovad soodsad tingimused armatuuri korrosiooni protsessi tekke alguseks [1].

Terasarmatuuri korrosioonikaitse oleneb betoonkaitsekihi tihedusest, kvaliteedist ja paksusest ning pragunemisest. Kaitsekihi tihedus ja kvaliteet saavutatakse maksimaalse vesitsementteguri ja minimaalse tsemendisalduse kontrolliga. [9]

Kloriidid jõuavad betooni kahel erineval viisil [1]:

- betooni segu valmistamisel, kasutades kloriide sisaldavaid betoonilisandeid (nt 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.

1.1.1 Keskkonnaklassid

Tulenevalt kloriidide põhjustatud mõjust betoonkonstruktsioonidele jagatakse keskkonnatingimused standardi EVS-EN 206:2014 [4] kohaselt kolme gruppi vastavalt, kas tegu on kloriididest, mereveest või külmumis/sulamisest põhjustatud mõjudest.

Tabel 1. Kloriididest põhjustatud keskkonnaklassid [4]

Klassi tähis	Keskkonnakirjeldus	Näiteid keskkonnaklasside rakendamise kohta
Kloriidist (välja arvatud merevee kloriidid) põhjustatud korrosioon		
Kui sarrust või tariraudu sisaldav betoon on kokkupuutes kloriidi, sealhulgas jäitevastaseid sooli sisaldava veega, mis ei pärine mereveest, on keskkonnaklassid järgmised:		
XD1	Mõõdukalt niiske	Betoonpinnad, millele langevad kloriide sisaldavad piisad
XD2	Märg, harva kuiv	Ujumisbasseinid. Betoon, mis on kokkupuutes kloriide sisaldava tootmisveega
XD3	Vaheldumisi märg ja kuiv	Konstruktsioonid osad, millele langevad kloriide sisaldavad piisad. Sillutised, autoparklate paneelid
Merevee kloriidist põhjustatud korrosioon		
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
Külmumise / sulamise mõju koos või ilma jäitevastaste ainetega		
Kui märjale betoonile mõjub nimetamisväärsel arvul külmumis/sulamistsükleid, on keskkonnaklassid järgmised:		
XF1	Mõõdukalt veega küllastunud, ilma jäitevastase aineta	Vihma ja külma eest kaitsmata püstsed betoonpinnad
XF2	Mõõdukalt veega küllastunud, jäitevastase ainega	Teekonstruktsioonide püstsed betoonpinnad, mis on külmumise ja jäitevastast ainet sisaldavate udupiiskade eest kaitsmata
XF3	Tugevasti veega küllastunud, ilma jäitevastase aineta	Vihma ja külma eest kaitsmata rõhtsad betoonpinnad
XF4	Tugevasti veega küllastunud, jäitevastase ainega või mereveega	Jäitevastaste ainete mõjule avatud tee- ja sillakatted. Betoonpinnad, mis on avatud jäitevastaseid aineid sisaldavatele pritsmetele ja külma mõjule. Pritsmete tsoonis asuvad külma mõjule avatud mererajatised

Käesoleva lõputöö raames keskendutakse sildadele, seega on peamise vaatluse all keskkonnaklassid XD1 ja XD3 ning XF2 ja XF4.

1.1.2 Orienteeruvad tugevusklassid kestvuse tagamiseks

Armatuuri korrosioonikaitse tagamiseks ja betooni kahjustuste vältimiseks küllalt vastupidava betooni valimine nõuab betooni koostise arvestamist. See võib nõuda kõrgemat betooni survetugevust, kui on vajalik konstruktsiooni arvutusel. Betooni tugevusklassi ja keskkonnaklassi vahelist seost võib kirjeldada orienteeruva tugevusklassi abil (vt Tabel 2). [9]

Tabel 2. Orienteeruvad minimaalsed tugevusklassid (autori kohandatud) [9]

Keskkonnaklass tabel 1 järgi						
Korrosioon						
	Korrosioon kloriididest			Korrosioon merevee Kloriididest		
	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Orienteeruv minimaalne tugevusklass	C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Betooni kahjustus						
	Külmumise/sulamise toime					
	XF1	XF2	XF3			
Orienteeruv minimaalne tugevusklass	C30/37	C25/30	C30/37			

1.1.3 Betoonkaitsekihi määramine

Sarruse korrosioonikaitse oleneb betoonkaitsekihi paksusest, tihedusest, kvaliteedist, pragunemisest ning keskkonna tingimustest [10]. Betoonkaitsekiht on kaugus betooni pinnale lähima armatuuri (kaasa arvatud põikarmatuur, rangid ja pinnaarmatuur) pinnast betooni lähima pinnani [9].

Betoonkaitsekiht peab tagama [9, 10]:

- sarruse piisava korrosioonikaitse;
- betooni ja sarruse vaheliste nakkejõudude ülekandmise;
- konstruktsiooni piisava tulepüsivuse.

Nimikaitsekiht defineeritakse minimaalse kaitsekihi C_{min} ja kaitsekihi lubatava hälbe ΔC_{dev} summana [9]:

$$C_{nom} = C_{min} + |\Delta C_{dev}| \text{ (valem 1)}$$

Nimikaitsekihi C_{nom} määramiseks tuleb projekteerimisel lisaks minimaalsele kaitsekihile arvesse võtta hälvet ΔC_{dev} . Nõutavat minimaalset kaitsekihti tuleb suurendada lubatud negatiivse hälbe absoluutväärtuse võrra. ΔC_{dev} väärtuse võib leida standardi EVS-EN 1992-1-1 [9] rahvuslikus lisas. Soovitatav väärtus on 10 mm. [9]

Tabelis 2 antud betooni orienteeruva tugevuse korral on soovitatav konstruktsiooniklass S4 (projekteeritud kasutusiga 50 aastat), soovitatavad muudatused konstruktsiooniklassi osas on antud tabelis 3. Soovitatav minimaalne konstruktsiooniklass on S1.

Tabel 3. Soovitatav konstruktsiooniklassi modifitseerimine (autori kohandatud) [9]

Konstruktsiooniklass			
Kriteerium	Keskkonnaklass tabel 1 järgi		
	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Projekteeritud kasutusiga 100 aastat	Suurendada klassi 2 võrra	Suurendada klassi 2 võrra	Suurendada klassi 2 võrra
Tugevusklass ¹⁾²⁾	$\geq C40/50$ vähendada klassi 1 võrra	$\geq C40/50$ vähendada klassi 1 võrra	$\geq C45/55$ vähendada klassi 1 võrra
Plaatelement (ehitusprotsess ei mõjuta armatuuri paiknemist)	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
Märkused 1) Tugevusklassi 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%.			

Keskkonnaklassi ja konstruktsiooniklassi arvesse võtva normaalbetoonis paikneva armatuuri ja pingearmatuuri minimaalse kaitsekihi suurus on $C_{min,dur}$. Konstruktsioonide klassifikatsiooni ja $C_{min,dur}$ väärtused on toodud tabelites 4 ja 5.

Tabel 4. Armatuurterase kestvusest tulenevad minimaalse kaitsekihi $C_{min,dur}$ väärtused (autori kohandatud) [9]

Keskkonnanõuded kaitsekihile $C_{min,dur}$ (mm)			
Konstruktsiooniklass	Keskkonnaklass vastavalt tabelile 1		
	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	20	25	30
S2	25	30	35
S3	30	35	40
S4	35	40	45
S5	40	45	50
S6	45	50	55

Tabel 5. Pingestusterase kestvusest tulenevad minimaalse kaitsekihi $C_{min,dur}$ väärtused (autori kohandatud) [9]

Keskkonnanõuded kaitsekihile $C_{min,dur}$ (mm)			
Konstruktsiooniklass	Keskkonnaklass vastavalt tabelile 1		
	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	30	35	40
S2	35	40	45
S3	40	45	50
S4	45	50	55
S5	50	55	60
S6	55	60	65

1.1.4 Betooni omaduste soovitatavad piirväärtused

Keskkonnamõjurite taluvuse suhtes betoonile esitatavad nõuded antakse, kas betooni koostisele ja kindlaksmääratud omadustele kehtestatud piirväärtustena või tulenevad need toimivusega seonduvatest projekteerimismeetoditest. Nõuded peavad arvesse võtma betoonkonstruktsiooni ettenähtud kasutusiga. [4]

Soovitused betooni koostise ja omaduste piirväärtuste valikuks standardile EVS-EN 197-1 [11] vastavate harilike tsementide (vt Tabel 7) kasutamisel, mille sobivus kasutamiseks kõnealustes keskkonnaklassides on tõestatud, on toodud tabelis 3 [4].

Tabel 6. Betooni omaduste soovitatavad piirväärtused [4] (autori kohandatud)

	Keskkonnaklass									
	Kloriididest tulenev korrosioonihoht						Külmumise/sulamise mõjur			
	Merevesi			Muud kloriidid, mis ei pärine mereveest						
	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4
Maksimaalne vesitsementtegur w/c	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45
Minimaalne tugevusklass	C30/37	C35/45		C30/37		C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	
Min tsemendisisaldus kg/m ³	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340
Min õhusisaldus (%)	-	-	-	-	-	-	-	4,0*	4,0*	4,0*
* Kui õhku ei manustata, tuleks betooni toimivust katsetada, kasutades sobivat katsemeetodit ja võrrelda betooniga, mille külmakindlus antud keskkonnaklassi puhul on kontrollitud.										

Betooni kasutuskohas kehtivad eeskirjad peavad sisaldama nõudeid, mille puhul eeldatav kasutusiga on ettenähtud hooldustingimuste korral vähemalt 50 aastat. Keskkonnaklasside kombinatsioonide puhul rakendub alati kõige rangem nõue. [4]

Juhul, kui ei ole täpsemat infot teada, kasutatakse käesoleva töö arvutustes tabelis 6 toodud maksimaalseid vesitsementtegureid.

Tabel 7. Harilike tsementide klassifikatsioon [11]

Põhi-tüübid	27 toote nimetused (harilike tsementide tüübid)	Koostis (% massist ^a)											Lisa-koostis- osad	
		Põhikoostisosad												
		Klinker	Kõrg- ahju- rabu	Peen- rāni	Putsolaan		Lendtuhk		Põle- tatud põlev- kivi	Lubjakivi				
					looduslik	tehislik	rāniline	Kaltsiu- miline		L	LL			
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandtsement	CEM I	95–100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
CEM II	Portland-rābutsement	CEM II/A-S	80–94	6–20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-S	65–79	21–35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	Portland-peenrānitsement	CEM II/A-D	90–94	–	6–10	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	Portland-putsolaantsement	CEM II/A-P	80–94	–	–	6–20	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-P	65–79	–	–	21–35	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-Q	80–94	–	–	–	6–20	–	–	–	–	–	–	0–5
	Portland-lendtuhtsement	CEM II/B-Q	65–79	–	–	–	21–35	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-V	80–94	–	–	–	–	6–20	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-V	65–79	–	–	–	–	21–35	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-W	80–94	–	–	–	–	–	6–20	–	–	–	–	0–5
	Portland-põlevkivitsement	CEM II/B-W	65–79	–	–	–	–	–	21–35	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-T	80–94	–	–	–	–	–	–	6–20	–	–	–	0–5
	Portland-lubjakivitsement	CEM II/B-T	65–79	–	–	–	–	–	–	21–35	–	–	–	0–5
		CEM II/A-L	80–94	–	–	–	–	–	–	–	6–20	–	–	0–5
		CEM II/B-L	65–79	–	–	–	–	–	–	–	21–35	–	–	0–5
		CEM II/A-LL	80–94	–	–	–	–	–	–	–	–	6–20	–	0–5
Portland-komposiitsement ^c	CEM II/B-LL	65–79	–	–	–	–	–	–	–	–	21–35	–	0–5	
	CEM II/A-M	80–88	<----- 12–20 ----->									0–5		
CEM III	Rābutsement	CEM II/B-M	65–79	<----- 21–35 ----->									0–5	
		CEM III/A	35–64	36–65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM III/B	20–34	66–80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
CEM IV	Putsolaantsement ^c	CEM III/C	5–19	81–95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM IV/A	65–89	–	<----- 11–35 ----->					–	–	–	0–5	
CEM V	Komposiit- tsement ^c	CEM IV/B	45–64	–	<----- 36–55 ----->					–	–	–	0–5	
		CEM V/A	40–64	18–30	–	<----- 18–30 ----->			–	–	–	–	0–5	
		CEM V/B	20–38	31–49	–	<----- 31–49 ----->			–	–	–	–	0–5	

a Tabelis toodud vārtus kehtib pōhi- ja lisakoostisosade summale.
b Peenrāni sisaldus ei tohi ūletada 10 %.
c Portland-komposiitsementide CEM II/A-M ja CEM II/B-M, putsolaantsementide CEM IV/A ja CEM IV/B ning komposiitsementide CEM V/A ja CEM V/B puhul tuleb tsemendi māaratlemisel mārkinda nende pōhikoostisosad (nāiteid vt jaotisest 8).

1.2 Kloriidide sissetungimine betooni

Kloriidide sissetungimissŭgavuse prognoosimiseks on maailmas vālja tōtatud mitmeid prognoosmudeleid. Kāesolevas tōos kasutatakse Rahvusvahelise konstruktsioonibetoonide fōderatsiooni (*fib*) poolt avaldatud *fib Bulletin 76: Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides* [3] ja *fib Bulletin 34: Model code for Service Life Design* mudelit [2].

1.2.1 Armatuurterase depassiveerimise piirseisundi võrrand pragunemata betoonile

Uurimisprojekti DuraCrete [12] raames on välja töötatud täistõenäosuslik projekteerimismeetod kloriidide poolt põhjustatud korrosiooni modelleerimiseks pragunemata betoonil. Ja meetodit on mõnevõrra kohandatud uurimisprojekti DARTS [13]. See põhineb piirseisundi võrrandil (valem 2), milles kriitilist kloriidisisaldust C_{crit} võrreldakse tegeliku kloriidisisaldusega armatuurterase sügavusel ajahetkel t $C(x=a,t)$. [2]

$$C_{crit.} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right] \text{ (valem 2)[2,3]}$$

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

1.2.2 Kriitiline kloriidisisaldus betoonis C_{crit}

Kriitiline kloriidisisaldus betoonis on kloriidi üldsisaldus, mis põhjustab armatuuri depassiveerumist ja korrosiooni algust, olenemata sellest, kas see põhjustab betoonpinnal nähtavaid korrosioonikahjustusi [2]. Kriitiline kloriidisisaldus sõltub paljudest parameetritest, nagu betooni pooride pH-tase, betooni ja terase liide, terase keemiline koostis, kokkupuutetingimused jne [3]. Kriitilist kloriidisisaldust väljendatakse protsendina tsemendi kogusest (%/c).

Vastavalt FIB34 [2] ja FIB76 [3] soovitusel saab kriitilist kloriidisisaldust piisavalt kirjeldada keskmise väärtusega $C_{crit} = 0,6 \text{ \%}/c$ (\%/tsement), standardhälbega 0,15, kasutades alumiseks piiriks $C_{crit} = 0,2 \text{ \%}/c$ ja ülemiseks piiriks $C_{crit} = 2,0 \text{ \%}/c$ [2, 3].

$$C_{crit.} = (\mu = 0,60 / \sigma = 0,15 / a = 0,2 / b = 2,0) [\text{\%/c}] [3]$$

1.2.3 Esialgne kloriidisisaldus betoonis C_0

Kloriidide sisaldust betoonis ei põhjusta mitte ainult kloriidi sissetungimine pinnalt, vaid see võib olla põhjustatud kloriidiga saastunud täitematerjalidest, tsemendist või betooni tootmiseks kasutatavast veest. Erinevalt pinnalt kloriidi sissetungimisel tekkivatest kloriidprofiilidest võib eeldada, et algse kloriidisisalduse jaotus on kogu betooni ulatuses ühtlane. [2] Vastavalt EVS-EN 206:2014 [4] ei tohi betooni kloriidisisaldus, väljendatuna protsendina tsemendi massist, ületada Tabel 8 toodud väärtuseid [4].

Kaasaegsete betoonisegude puhul jääb esialgne kloriidide sisaldus alla 0,05 \%/c , seega peab FIB76 [3] antud teguri väärtust ebaoluliseks ja C_0 väärtusena kasutatakse väärtust $C_0 = 0 \text{ \%}/c$ [14]. Vanemates betoonkonstruktsioonides võib esialgne kloriidisisaldus olla üsna kõrge [3].

Tabel 8. Betooni maksimaalne kloriidisisaldus [4]

Betooni kasutusala	Kloriidisisaldusklass ^a	max Cl-sisldus tsemendi massist ^b %
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 ^c	0,40
Sisaldab eelpingestatud terassarrust vahetus kontaktis betooniga	Cl 0,10	0,10
	Cl 0,20	0,20

a Eriotstarbeliste betoonide puhul sõltub klassi valik betooni kasutamiskohas kehtivatest eeskirjadest.
b Kui on kasutatud peenlisandeid ja neid on tsemendisisalduses arvesse võetud, siis esitatakse kloriidisisaldus kui kloriidiooni massiprotsent tsemendi pluss arvesse võetud peenlisandi summaarsest massist.
c Kasutuskohas kehtivate eeskirjade kohaselt võib CEM-III-tsemente sisaldavates betoonides olla lubatud kasutada erinevaid kloriidisisalduse klasse.

Standardis EVS-EN 206:2014 [4] on raudbetooni maksimaalne algne kloriidisisaldus C_0 piiratud 0,4 %/c, mida peetakse XS ja XD keskkonnaklasside betoonide puhul siiski liiga kõrgeks. Mõned Euroopa riiklikud rakendusdokumendid annavad standardile EVS-EN 206:2014 [4] täiendavaid piiranguid.[3] Sarnaselt on Eestis Transpordiamet oma juhendiga „Teetööde tehnilised kirjeldused“ [15] määranud, et konstruktsioonides kasutatava betooni lisaainete maksimaalne kloriidisisaldus (Cl) on kuni Cl 0,10 [15].

1.2.4 Kloriidisisaldus betooni pinnal C_s ja sügavusel $C_{s,\Delta x}$

Kloriidisisaldus betooni pinnal (C_s) ja sügavusel Δx ($C_{s,\Delta x}$) on muutujad, mis sõltuvad materjali omadustest, konstruktsiooni geomeetristest ja keskkonnatingimustest. Materjalide omadustest mõjutavad kõige enam sideaine tüüp ja betooni koostis. Keskkonnatingimustest kõige olulisem on ümbritseva keskkonna kloriidikontsentratsioon. Peale selle võib tähtsust omada konstruktsioonelemendi geometria, kaugus kloriidiallikast ja tuule suund.[2]

Talvisest teesoolamisest tulenev kloriididega saastunud vee kloriidisisaldus varieerub oluliselt rohkem kui merevee kloriidisisaldus [3]. Täpset kloriidide mõju on väga raske hinnata, sest soola hulka, mida kasutatakse, on raske hinnata selle hooajalise kasutamise tõttu [14]. Tegelikult kokkupuutetingimustes varieerub kloriidide pinnasisaldus ümbritseva lahuse kloriidisisalduse kõikumiste, peamiselt jäätõrjesoolade kasutamise, betooni niiskustingimuste, ajaliste ja ruumiliste muutuste jms tõttu. Kuna teesoolade kasutamise sagedus ja kogused on väga erinevad, siis on soovitus linnakeskkonnas (XD1, XD2 ja XD3) kasutada variatsioonikordajat $CoV = 75\%$. [3, 14]

Tabel 9. Betooni pinna kloriidisisaldus sõltuvalt keskkonnaklassist [3, 14]

Keskkonnaklass	$C_s/C_{s,\Delta x}$	
XD1	$0,5 \leq \mu \leq 1,5$	$CoV = 0,75$
XD2	$2,0 \leq \mu \leq 4,0$	$CoV = 0,75$
XD3	$2,0 \leq \mu \leq 4,0$	$CoV = 0,75$

1.2.5 Armatuuri kaitsekiht C_{nom}

Betoonkaitsekiht on kaugus betooni pinnale lähima armatuuri (kaasa arvatud põikiarmatuur, rangid ja pinnaarmatuur) pinnast kuni betooni lähima pinnani [9]. Konstruktsioonides tegelikult saavutatud armatuuri kaitsekihi paksus varieerub ja seetõttu tuleb seda pidada pigem stohhastiliseks muutujaks kui konstantseks väärtuseks. Suurtel konstruktsioonidel kasutatakse tavaliselt nimikaitsekihti. [3]

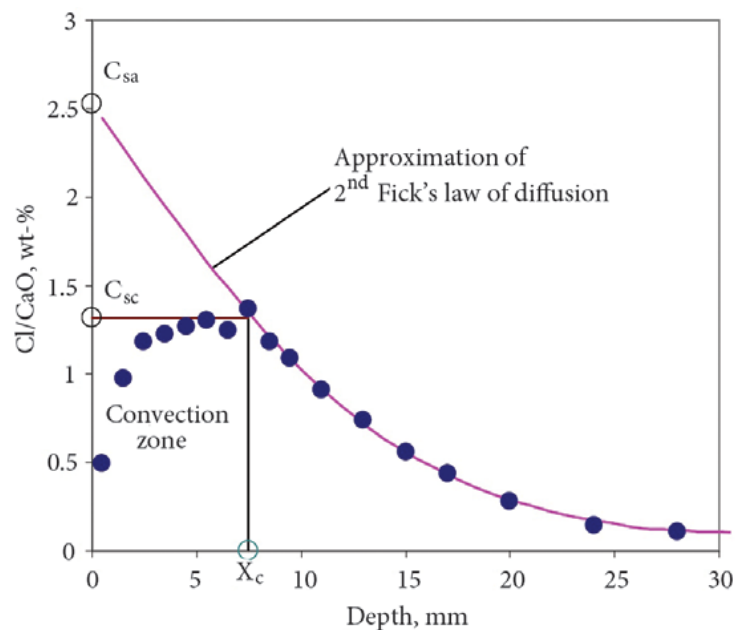
Nimikaitsekiht defineeritakse minimaalse kaitsekihi C_{min} ja kaitsekihi lubatava hälbe ΔC_{dev} summana [9]:

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \text{ (valem 3)}$$

Eestis kasutatakse soovitatavat väärtust $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$ [9]

1.2.6 Konvektsiooni tsooni sügavus Δx

Kloriidide tungimist betooni modelleerib Fick'i teine seadus. Võimalik kloriidisisaldus betooni erinevatel sügavustel on näidatud joonisel 1. Kloriidiooniprofiil näitab kahte erinevat osa. Esimene osa sügavusest Δx näitab kloriidisisalduse vähenemist pinna lähedal, kus kloriidioonid uhutakse suveperioodil osaliselt vihmaveega välja. See osa moodustab konvektsiooni tsooni. Teine osa vastab Fick'i difusiooniseadusele (difusioonitsoon).[16]



Joonis 1. Kloriidisisaldus betoonis [16]

Teepinnast kaugemal kui 1,5 m (pritsmete tsoon) ei ole konvektsioonitsooni teke enam tuvastatav, $\Delta x=0$. Pidevalt vee all olevate konstruktsioonide puhul on konstruktsiooni betoonpinna kloriidisisaldus võrdne kloriidi küllastuskontsentratsiooniga. Seega pole sel juhul ülekandeparameetrit vaja. Kui konstruktsioon on vaheldumisi märg ja kuiv, tuleb määrata konvektsioonitsooni sügavus Δx , milleni esineb kõrvalekaldeid difusioonikäitumisest vastavalt Fick'i lahendusele. [2] Käesolevas töös rakendatakse FIB76's [3] toodud Δx .

Tabel 10. Konvektsioonitsooni sügavus Δx [3]

Keskkonnaklass		Δx [mm]
XD1	Pritsmed, mõõdukalt niiske	Püsivalt 0
XD2	Märg, harva kuiv, veealune	
XD3	Vaheldumisi märg ja kuiv	Keskväärtus $\mu = 10$; standardhälve, $\sigma = 5$; alumine piir $a = 0$; ülemine piir $b = 50$

1.2.7 Kloriidi difusioonikoefitsient $D_{app,C}$

Antud koefitsienti kasutatakse betooni difusioonilisuse kirjeldamiseks. Veega küllastunud betooni puhul mõjutab kloriidi difusioonikoefitsienti enim betooni pooride struktuur (pooride arv ja suuruse jaotus). Arvutusteks vajalikud kloriidiprofiilid saab leida olemasolevate konstruktsioonidest või katsekehadelt, mida on hoitud sarnastes tingimustes projekteeritava konstruktsiooni keskkonnaga [14].

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \text{ (valem 4)[2]}$$

kus $D_{RCM,0}$ – kloriidi migratsiooni koefitsient, (mm^2/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 [17]. Antud meetodil on kloriidi difusioonikoefitsiendi määramine aga väga aeglane, mistõttu kasutatakse kiirendatud meetodit RCM testi näol. [14]

1.2.8 Difusiooni temperatuurisõltuvuse parameeter k_e

Kloriidide edasikandumine betoonis on termodünaamiline protsess, kus kloriidide difusioonikiirus betoonis on mõjutatud temperatuurist. Seega on kasutusele võetud keskkonnaülekanne parameeter k_e , mis võtab arvesse välitemperatuuri T_{real} mõju kloriidide difusioonikiirusele [3, 14].

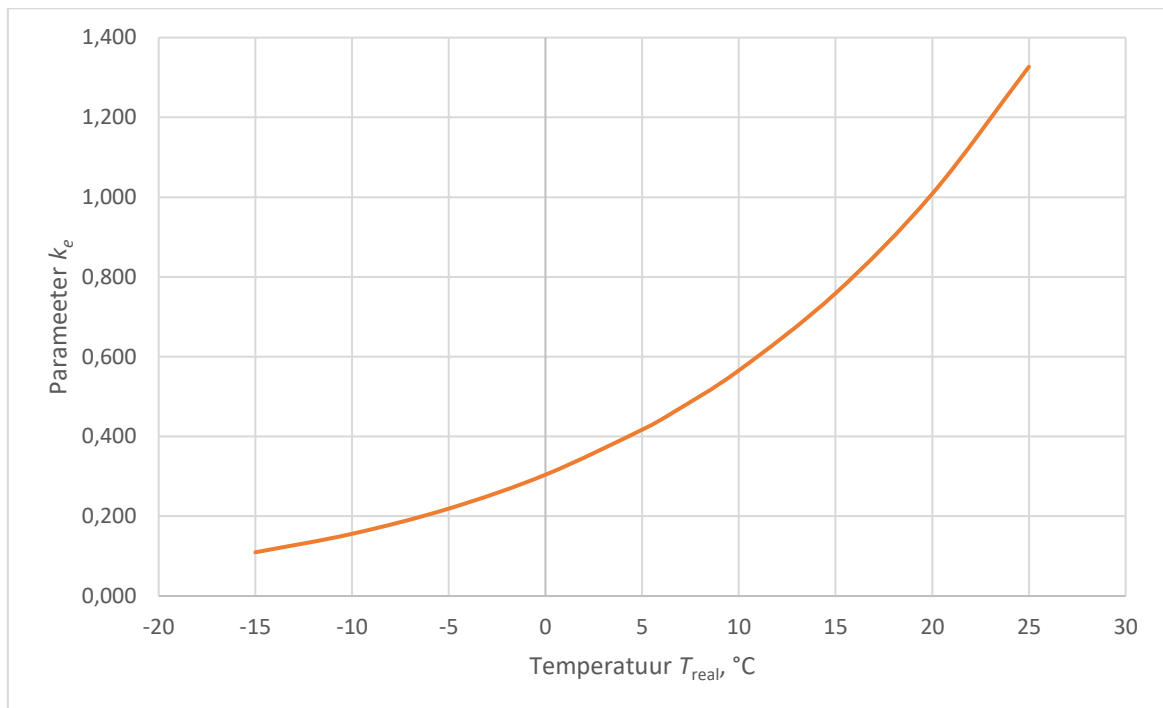
$$k_e = \exp\left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right) \text{ (valem 5)[3]}$$

kus b_e – temperatuuri koefitsient, (K);

T_{ref} – referents temperatuur, (K);

T_{real} – konstruktsiooni või ümbritseva õhu temperatuur, (K).

$T_{ref} = 293 \text{ K}$ (20°C) on standard temperatuur RCM testil. T_{real} puhul võib arvesse võtta konstruktsioonile lähimast ilmajaamast saadud aasta keskmist välitemperatuuri. [3]



Joonis 2. Parameetri k_e sõltuvus välisõhu temperatuurist T_{real} °C

Käesoleva töö raames uuritakse nelja Lõuna - Eestis paiknevat silda ja neile sildadele lähim Riigi Ilmateenistuse vaatlusjaam on Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam. Vaatlusandmete põhjal oli perioodil 2004-2021 vaatlusjaamas mõõdetud madalaim keskmine õhutemperatuur jaanuaris ($T = -4,6^\circ\text{C}$) ja veebruaris ($T = -4,6^\circ\text{C}$) ja kõrgeim juulis ($T = 18,2^\circ\text{C}$) ning aasta keskmine õhutemperatuur ($T = 6,6^\circ\text{C}$).

Aasta keskmise õhutemperatuuri $T_{real}=6,6^\circ\text{C}$ korral on parameeter $k_e=0,460$. Kuna mudeli arvutustes tuleb kasutada temperatuuri Kelvini kraadides, siis kasutatakse suurust $T_{real}=279,75 \text{ K}$.

1.2.9 Kloriidi migratsioonikoefitsient $D_{RCM,0}$

Kloriidi migratsioonikoefitsient on kloriidi indutseeritud korrosioonimudelil materjali omaduste kirjeldamise üks peamisi parameetreid [2]. Katsekehade abil difusioonikoefitsiendi määramine on aeglane protsess, mistõttu kasutatakse kiirendatud RCM testi (*Rapid Chloride Migration test*) [3, 14]. Erinevate kiirtestimeetodite hulgas osutus kiirkloriidi migratsiooni meetod (RCM) teoreetiliselt selgeks, eksperimentaalselt lihtsaks ja seotud täpsusega (korratavusega) paljutõotavaks tööriistaks. Kasutusea projekteerimisel leiab $D_{RCM,0}$ jaoks lähtemuutujatena sobivaid andmeid kirjandusest. [2]

$D_{RCM,0}$ on normaaljaotusega muutuja ja selle standardhälbe saab arvutada valemi 6 järgi [2].

$$s = 0,2 \cdot m \text{ (valem 6)[2]}$$

kus s – koefitsiendi $D_{RCM,0}$ standardhälve;

m – koefitsiendi $D_{RCM,0}$ keskväärtus.

$D_{RCM,0}$ tuleks kvantifitseerida vastavalt EVS-EN 12390-18:2021 [18]. Kui katseandmed pole kättesaadavad, võib orienteerumiseks kasutada **Tõrge! Ei leia viiteallikat.** tabelis 11 olevaid keskväärtuseid.

Tabel 11. $D_{RCM,0}$ keskväärtused, kui $t_0 = 28$ päeva [3, 14]

Tsemendi tüüp	$D_{RCM,0}$ (mm ² /a)					
	w/c _{eqv}					
	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	151,5	157,8	määramata
CEM II/A-V	176,7	217,7	284	344	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	88,4	94,7	107,3

1.2.10 Vananemise alafunktsioon $A(t)$

Kuigi kloriidi migratsioonikoefitsient on materjali omaduste kirjeldamise peamine parameeter, on praktikas vananemise eksponendil α , mis toob aja jooksul kaasa kloriidi difusioonikoefitsiendi $D_{app(t)}$ vähenemise, palju suurem mõju betooni kestvusele

(vastavalt kasutatud mudelile). Vananemise eksponent sõltub nii materjalidest kui ka keskkonnaklassist. [3]

Vananemise alafunktsioon $A(t)$ on kirjeldatud järgneva valemiga:

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \quad (\text{valem 7}) [2]$$

kus α – vananemise eksponent;

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

t – aeg, (aastat).

Tabel 12. Vananemise eksponent α keskkonnaklasside XD2, XD3, XS2 ja XS3 korral [3, 14]

Tsemendi tüüp	Vananemise eksponent α	
	Keskväärtus, μ	Standardhälve, σ
$0,40 \leq w/c \leq 0,60$		
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

Tabel 13. Vananemise eksponent α keskkonnaklasside XD1 ja XS1 korral [3, 14]

Tsemendi tüüp	Vananemise eksponent α	
	Keskväärtus, μ	Standardhälve, σ
Kõik tsemenditüübid	0,65	0,12

Vananemise eksponendi määramiseks tuleb arvestada olemasolevate konstruktsioonide kloriidi difusioonikoefitsiendi $D_{app(t)}$ pikaajalist käitumist, analüüsides kloriidiprofiilide arengut aja jooksul. [3]

1.2.11 Projekteeritud eluiga t_{SL}

Sarnaselt hetkel kasutusel olevale standardile EVS-EN 1990:2002 [19], määrab ka FIB34 [2] indikatiivsed väärtused (vt tabel 14) 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. [14]

Tabel 14. Projekteeritud eluea t_{SL} indikatiivsed väärtused [19]

Projekteeritud kasutusea kategooria	Projekteeritud kasutusiga (aastad)	Näited
1	10	Ajutised konstruktsioonid *
2	10 - 25	Asendatavad konstruktsiooniosad, nt kraanatalad, toed
3	15 - 30	Põllumajanduslikud jms konstruktsioonid
4	50	Hooned ja muud sarnased kandekonstruktsioonid
5	100	Monumentaalsed hooned, sillad jm ehitustehnilised rajatised
* Konstruktsioone või konstruktsiooniosi, mida saab lahti monteerida uuesti kasutamise eesmärgiga, ei tohiks lugeda ajutiseks konstruktsiooniks		

2. KLORIIDIDE SISSETUNGIMISE ARVUTUSMUDELI RAKENDAMINE

Eelnevates peatükkides tutvustati arvutusmodeli erinevaid osi. Käesolevas peatükis uuritakse kloriidide liikumist betoonis erinevate tsementide puhul vastavalt mudelile.

Jooniste loetavuse huvides on käesolevates arvutustes kasutatud ainult algandmete keskväärtuseid. Sellest tulenevalt võrreldakse samuti tulemusi kriitilise kloriidisisalduse keskväärtusega $C_{crit} = 0,6 \text{ \%}/c$.

Kui standard EVS-EN 206:2014 [4] kohaselt võib terrassarrust või teisi sissebetoneeritud metalliosi sisaldava betooni maksimaalne kloriidisisaldus tsemendi massist olla 0,2%, on antud töö arvutustes kasutatud suurus 0,1%, mis tuleneb Transpordiameti juhendis „Teetööde tehniline kirjeldus“ [15] toodud nõudest betoonkonstruktsioonidele.

Kuna käesoleva töö raames uuritakse kloriidide sisse tungimist betooni sildade puhul, siis kasutatakse mudeli arvutustes projekteeritud eluiga 100 aastat. Vastavalt tabelile 3 tuleb konstruktsiooniklassi sellisel juhul tõsta 2 võrra. Samas on teada, et betooni tootmine on tagatud kvaliteedikontrolliga, siis sellest tulenevalt võib klassi langetada 1 võrra. Selliselt saame konstruktsiooniklassiks S5. Vastavalt konstruktsiooniklassile ja keskkonnaklassile leiti tabelist 4 minimaalsed kaitsekihid.

Arvutustes kasutatavad algandmete info on koondatud tabelisse 15.

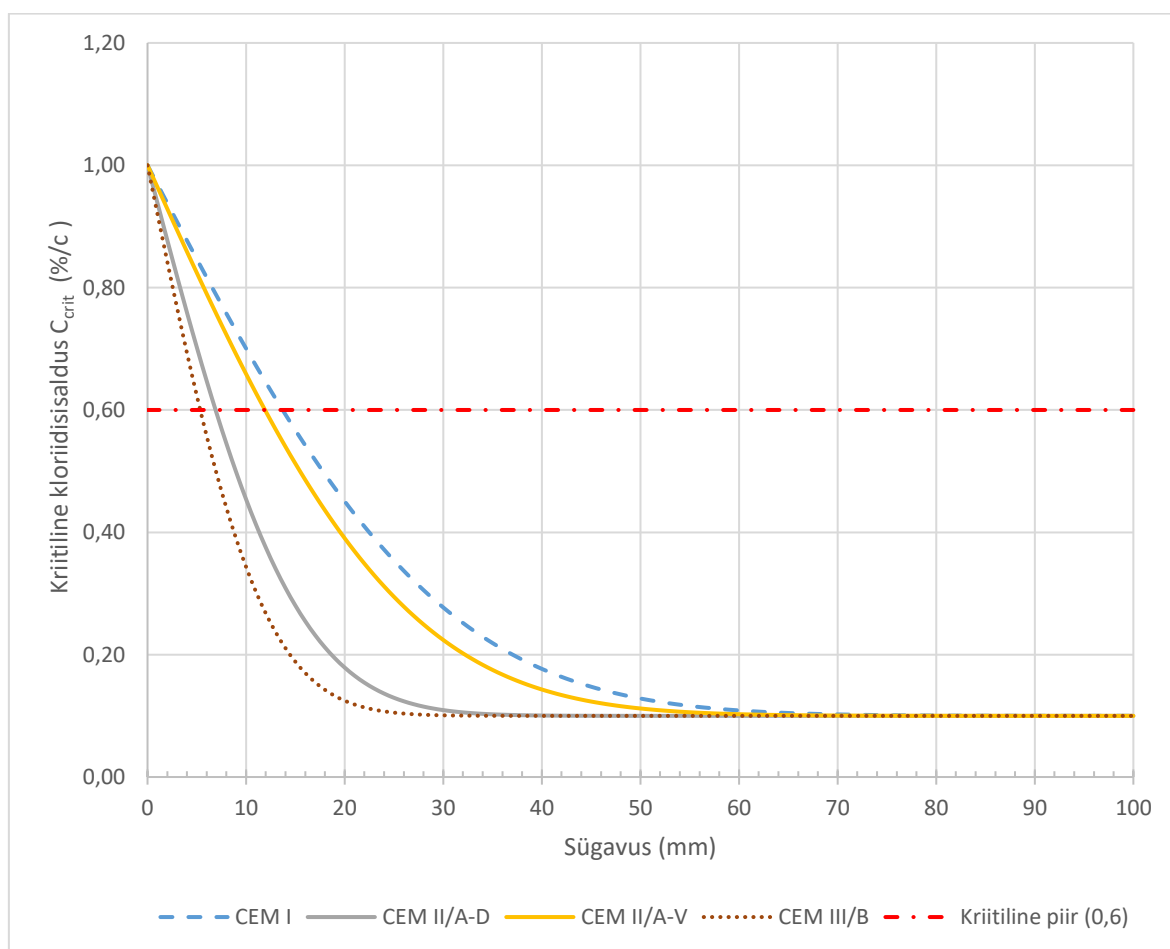
Tabel 15. Kloriididest põhjustatud korrosiooni prognoosimudeli lähteandmed

Parameeter		Ühik	Kirjeldus	Jaotus	Keskvärtus, μ	
$D_{APP}(t)$	$D_{RCM,0}$	mm^2/a	Kloriidi migratsioonikoefitsient	Normaal	Tabel 11	
	α	-	Vananemise eksponent	Beeta	Tabel 12 ja 13	
	t_0	aastat	Referentsaeg	Konstant	0,0767	
	k_e	b_e	K	Temperatuurikoefitsient	Normaal	4800
		T_{ref}	K	Referentstemperatuur	Konstant	293
		T_{real}	K	Konstruktsiooni elemendi temperatuur	Normaal	279,75
$C_{S,\Delta x}$	\%/c	Kloriidisisaldus sügavusel Δx ajal t	-	Tabel 9		
Δx	mm	Konvektsioonitsooni sügavus	Beeta	Tabel 10		
C_0	\%/c	Esiagne kloriidisisaldus betoonis	Konstant	0,1		
C_{crit}	\%/c	Kriitiline kloriidisisaldus	Beeta	0,6		
a	mm	Betooni kaitsekiht	Normaal	Tabel 4		

2.1 Korrosioon kloriididest keskkonnaklassis XD1

Keskkonnaklassi XD1 kuuluvad konstruktsioonid, mis on mõõdukalt niisked ja neile võib langeda kloriide sisaldavaid piiskasid.

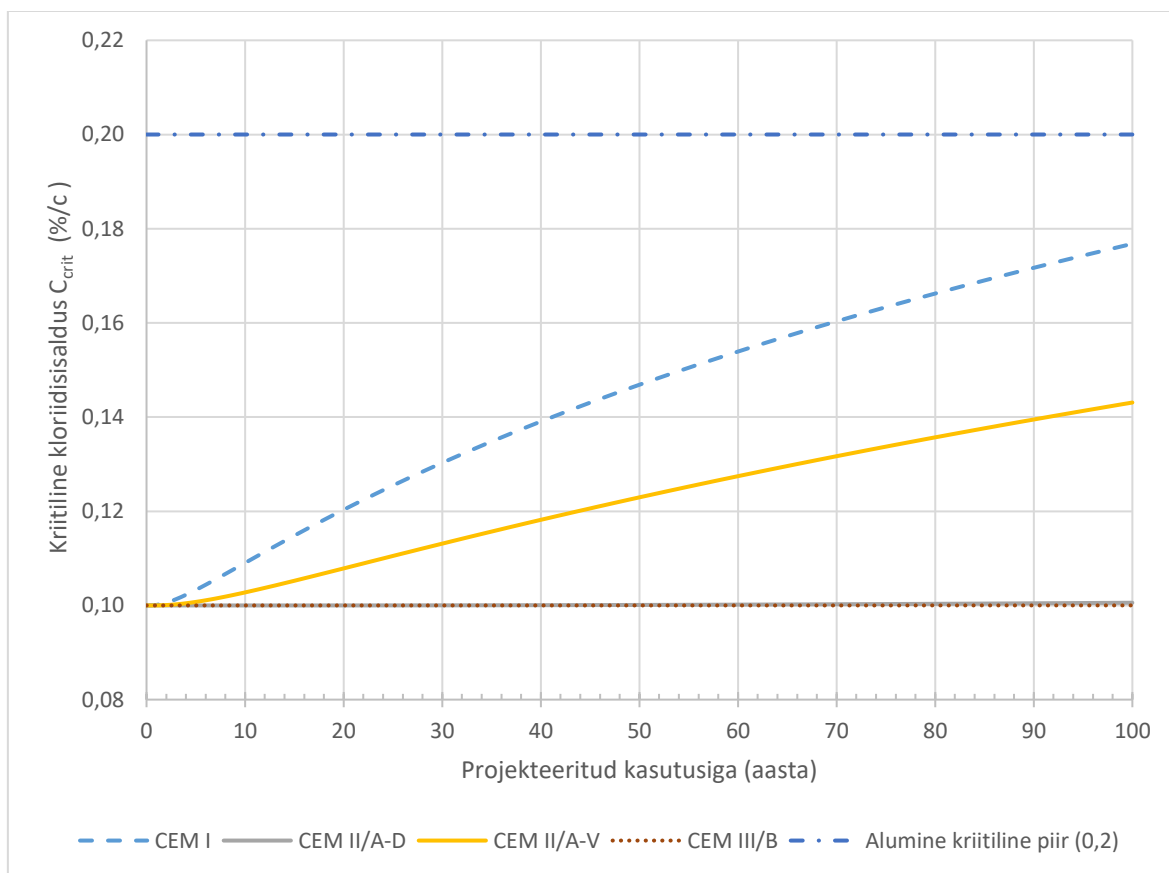
Mudeliga leitud eeldatav kloriidisisalduse profiil keskkonnaklassis XD1 erinevate tsementide puhul on kajastatud joonisel 3 ja 4. Vananemise eksponent XD1 klassis on 0,65. Kloriidisisaldus betooni pinnal on võetud keskväärtused vastavalt tabelile 9. Keskkonnaklassis XD1 on keskväärtuseks 1,0 %/c. Betoonkaitsekiht XD1 ja S5 puhul on 40 mm. Konvektsioonitsooni sügavus on 0 mm.



Joonis 3. Keskkonnaklass XD1, $t_{SL}=100$, kriitiline kloriidisisaldus sügavusel x

Jooniselt 3 on näha, et tsemendi CEM I puhul on 100 aasta jooksul kloriidide kriitiline piir 0,6 %/c sügavusel 14 mm. Samas tsemendi CEM III/B puhul on vastav näitaja 6 mm.

Keskonnaklass XD1 ja konstruktsiooniklass S5 minimaalse kaitsekihi 40 mm sügavusel on kloriidide sisaldus betoonis tsemendi CEM I puhul 0,18 %/c ja CEM II/A-V puhul 0,14 %/c ning CEM II/A-D ja CEM III/B puhul on see 0,10 %/c.



Joonis 4. Keskonnaklass XD1, $t_{SL}=100$, kriitiline kloriidisisaldus ajal t

Joonisel 4 on kujutatud kloriidisisaldus sõltuvalt projekteeritud kasutuseast keskkonnaklass XD1 ja konstruktsiooniklass S5 korral. Betoonkaitsekihi paksus on määratud vastavalt tabelile 4, 40 mm. Jooniselt on näha, et isegi kõige kehvemal juhul, tsemendi CEM I puhul, on 100 aasta möödudes kloriidisisaldus 0,18 %/c. See näit ei jõua kloriidide kriitilise piiri keskväärtuse (0,6 %/c) lähedalegi jäädes alla isegi vastavalt FIB34 ja FIB76 soovitatud alumist piiri 0,2 %/c.

Samuti on jooniselt näha, et tsementide CEM II/A-D ja CEM III/B puhul jääb kloriidi sisaldus projekteeritud eluea lõpul praktiliselt muutumatuks.

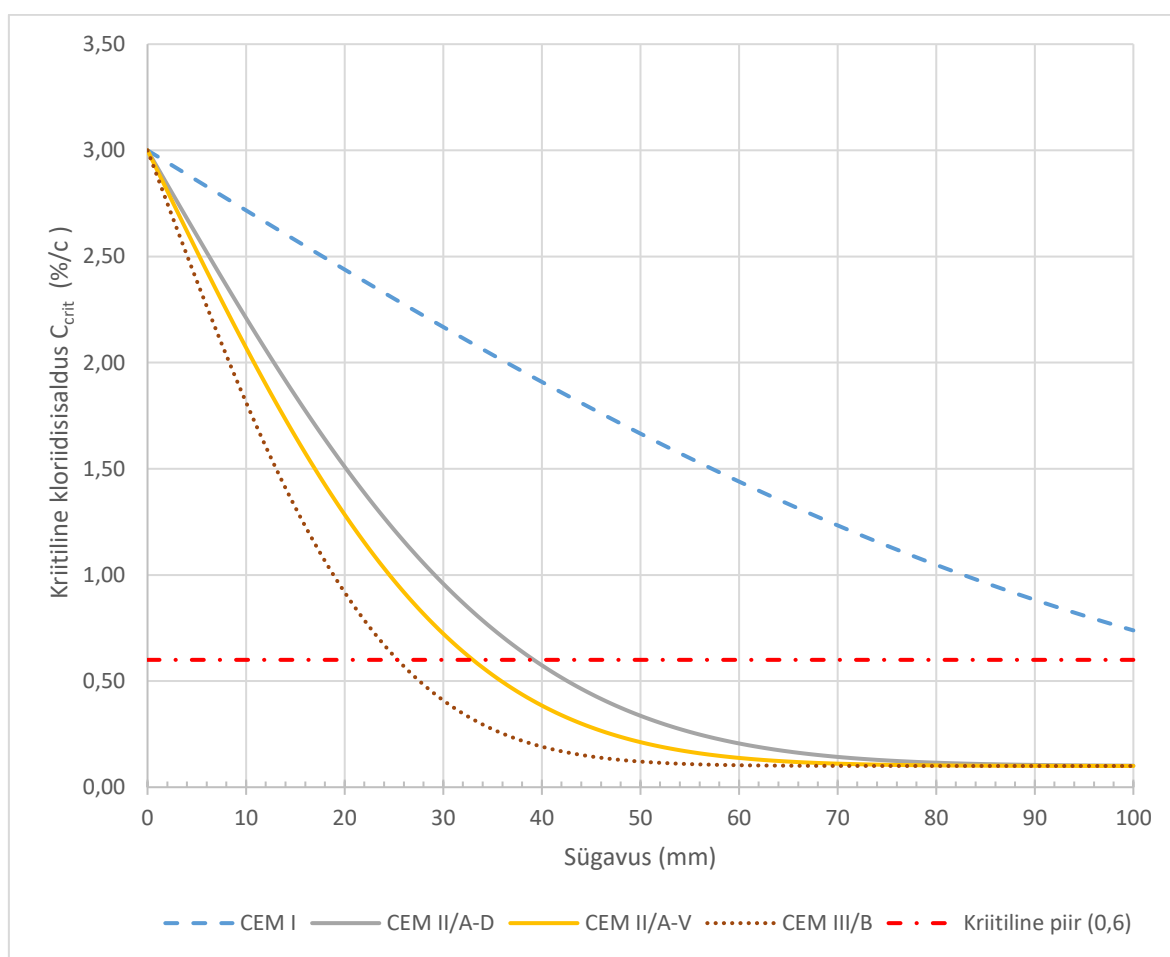
Arvestades, et arvutustes on kasutatud vastavalt tabelile 6 maksimaalset vesitsemenditegurit 0,55 võib eeldada, et tegelikult on kloriidide sisaldus veel väiksem. Seega võib vastavalt joonistel 3 ja 4 nähtule väita, et nõuetega ette nähtud betoonkaitsekihi 40 mm puhul, keskkonnaklassis XD1 100 aasta jooksul kloriididest põhjustatud korrosiooni armatuurterasele tekkida ei tohiks.

2.2 Korrosioon kloriididest keskkonnaklassis XD2

Keskkonnaklassi XD2 kuuluvad konstruktsioonid, mis on pidevalt märjad (harva kuivad). Siia kuuluvad näiteks ujumisbasseinid. Samuti betoon, mis on kokkupuutes kloriide sisaldava tootmisveega.

Mudelige leitud erinevate tsementide eeldatavad kloriidisisalduste profiilid keskkonnaklassis XD2 on kajastatud joonistel 5 ja 6. Vananemise eksponent on XD2 klassis igal tsementitüübil erinev (tabel 12), mille keskvärtus varieerub 0,30 – 0,60.

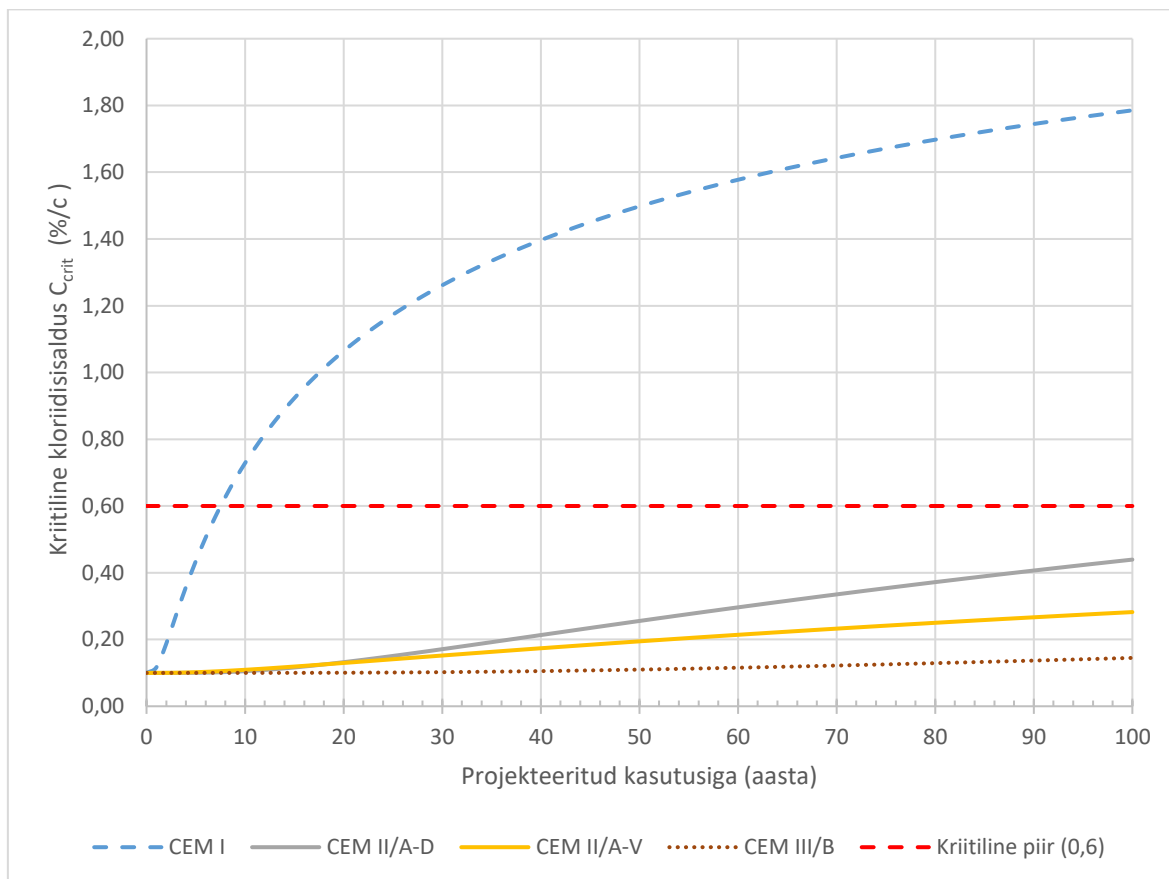
Kloriidisisaldus betooni pinnal on keskvärtus 3,0 %/c. Betoonkaitsekiht keskkonnaklass XD2 ja konstruktsiooniklass S5 korral on 45 mm. Konvektsioonitsooni sügavus 0 mm.



Joonis 5. Keskkonnaklass XD2, $t_{SL}=100$, kriitiline kloriidisisaldus sügavusel x

Joonisel 5 on kajastatud kriitiline kloriidisisalduse profiil projekteeritud elueal 100 aastat. Graafikult on näha, et tsemendi CEM I puhul on isegi 100 mm puhul kriitiline piir ületatud olles 0,74 %/c. Ülejäänud tsemendi tüüpide puhul on kaitsekihi 45 mm korral

kloriidide sisalduse keskväärtus tagatud. Sügavusel 45 mm on see tsemendi CEM II/A-D puhul 0,44 %/c, CEM II/A-V 0,28 %/c ja CEM III/B 0,14 %/c.



Joonis 6. Keskkonnaklass XD2, $t_{SL}=100$, kriitiline kloriidisisaldus ajal t

Joonisel 6 on kujutatud kloriidisisaldus sõltuvalt projekteeritud kasutuseast keskkonnaklass XD2 ja konstruktsiooniklass S5 korral. Jooniselt on näha, et tsement CEM I puhul hakkab armatuur eeldatavasti betoonis roostetama juba 8 aasta möödudes, kui saavutatakse kriitiline kloriidisisaldus 0,60 %/c. Ülejäänud tsemendi tüüpide puhul on näha mõõdukat kloriidide taseme tõusu, aga kõigi puhul jääb kloriidide sisaldus projekteeritud eluea lõpul alla kriitilist piiri. CEM III/B puhul isegi alla FIB34 ja FIB76 soovitatud alumist piiri 0,2 %/c, olles 0,14 %/c.

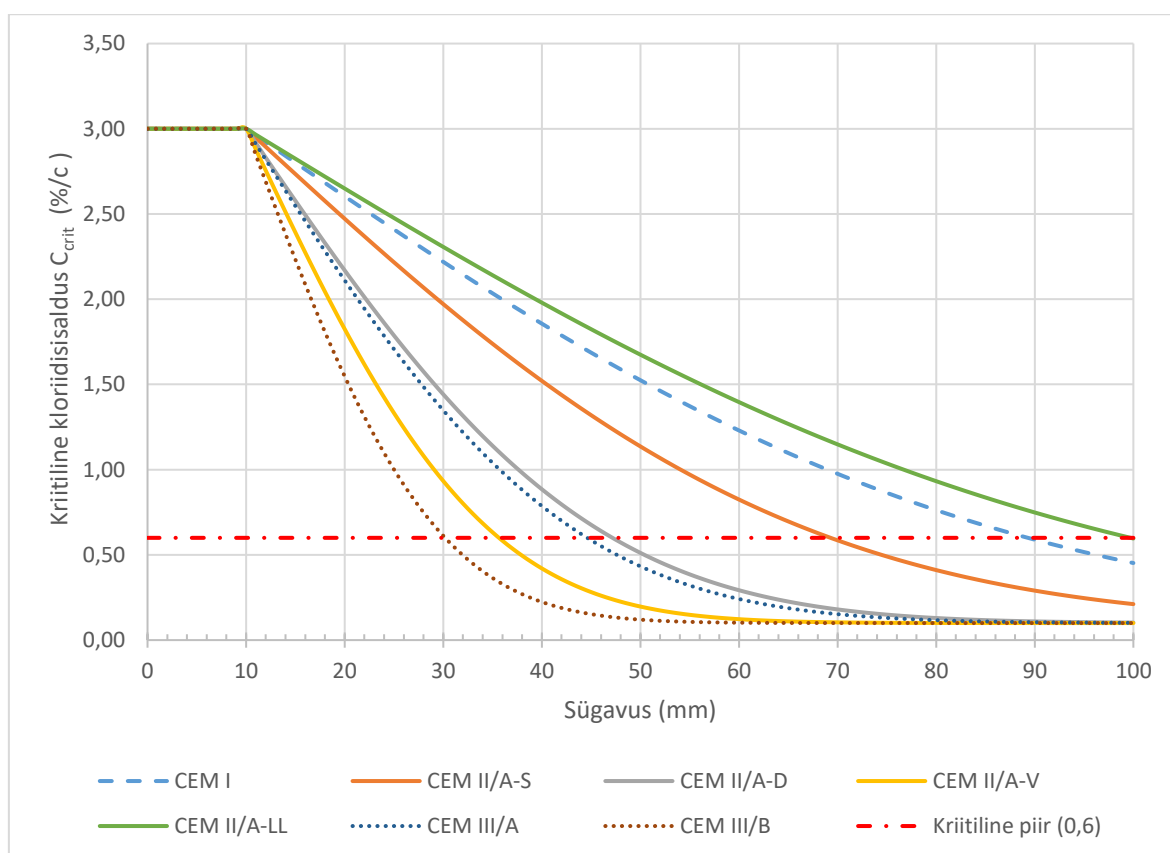
Arvestades, et arvutustes on kasutatud vastavalt tabelile 6 maksimaalset vesitsementtegurit 0,55 võib eeldada, et tegelikult on kloriidide sisaldus väiksem. Sellest hoolimata nähtub joonistelt 5 ja 6, selgelt, et CEM I ei sobi keskkonnaklass XD2 puhul. Isegi, kui kasutada arvutustes vesitsementtegurit 0,4, saavutatakse CEM I-ga kloriidide kriitiline piir 24 aasta möödudes.

2.3 Korrosioon kloriididest keskkonnaklassis XD3

Keskkonnaklassi XD3 kuuluvad konstruktsioonid, mis on vaheldumisi märjad ja kuivad. Sellesse klassi kuuluvad konstruktsiooni osad, millele langevad kloriide sisaldavad piisad (sillutised, autoparklate paneelid, silla servapruss).

Erinevate tsementide eeldatavad kloriidisisalduste profiilid keskkonnaklassis XD3 on kajastatud joonistel 7 ja 8. Vananemise eksponent on XD3 klassis igal tsemenditüübil erinev (tabel 12), mille keskväärtused varieeruvad 0,30 – 0,60.

Kloriidisisaldus betooni pinnal keskväärtus 3,0 %/c. Betoonkaitsekiht keskkonnaklass XD3 ja konstruktsiooniklass S5 korral on 50 mm. Konvektsioonitsooni sügavus 10 mm

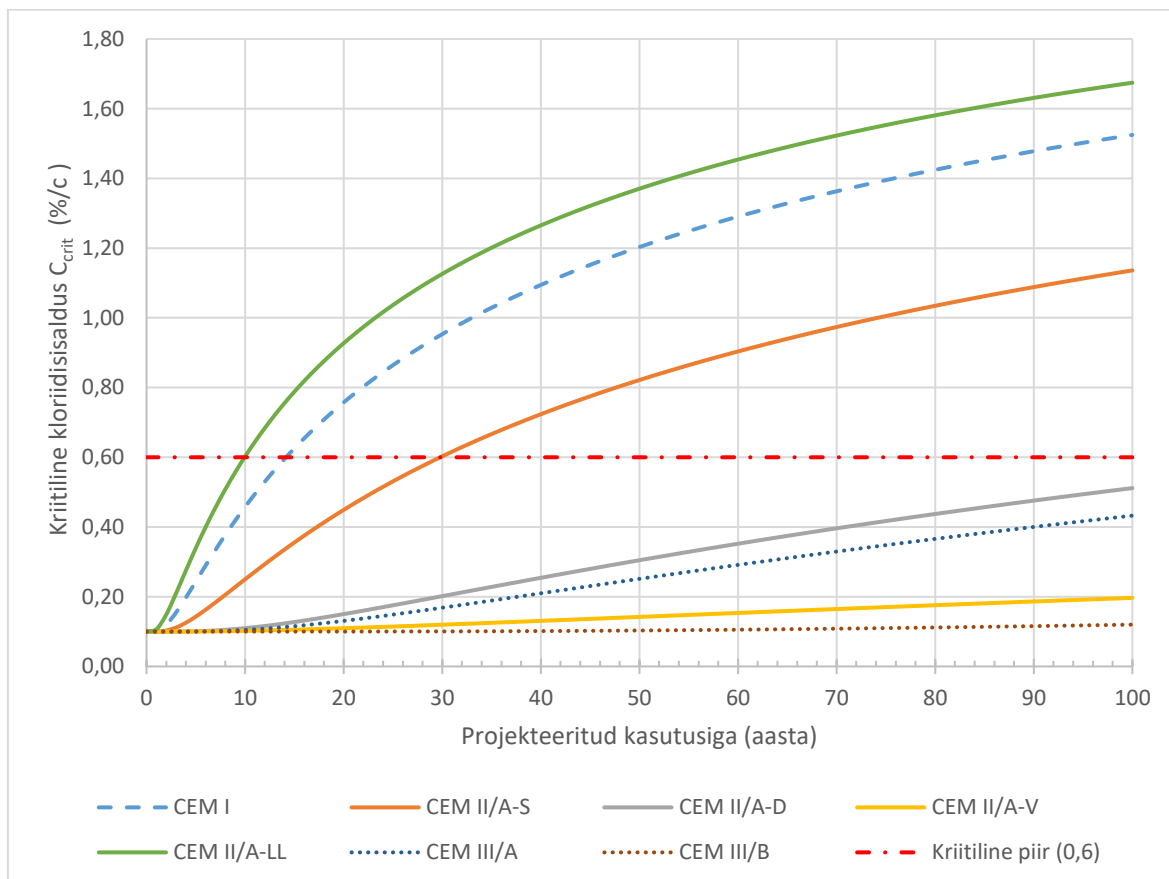


Joonis 7. Keskkonnaklass XD3, $t_{sL}=100$, kriitiline kloriidisisaldus sügavusel x

Keskkonnaklass XD3 kohta on rohkem uuritud ja tänu sellele oli kirjanduses rohkem infot erinevate tsementide kohta, mis kajastub ka joonistel 7 ja 8. Kui keskkonnaklasside XD1 ja XD2 oli info nelja tsemendi tüübi kohta, siis klassis XD3 on arvutused teostatud seitsme erineva tsemendi tüübi kohta.

Jooniselt 7 on näha, et projekteeritud eluea möödudes on kolme tsemendi puhul sügavusel 50 mm kloriidide kriitiline sisaldus ületatud. CEM II/A-LL puhul on isegi

sügavusel 100 mm kriitiline piir saavutatud. Kriitiline piir saavutatakse CEM III/B puhul sügavusel 30 mm, CEM II/A-V puhul 36 mm, CEM III/A puhul 45 mm ja CEM II/A-D puhul 48 mm. Lisaks CEM II/A-LL on kaitsekihi 50 mm puhul kriitiline piir ületatud ka tsementidega CEM II/A-S (70 mm) ja CEM I (89 mm) puhul.



Joonis 8. Keskkonnaklass XD3, $t_{SL}=100$, kriitiline kloriidisisaldus ajal t

Joonisel 8 on kujutatud kloriidisisaldus sõltuvalt projekteeritud kasutuseast keskkonnaklass XD3 ja konstruktsiooniklass S5 korral. Jooniselt on näha, et keskvaartustega on tsementidega CEM II/A-LL, CEM I ja CEM II/A-S juures juba probleem, aga kriitiliste väärtustega on asi veel hullem. Kloriidisisalduse kriitiline piir saavutatakse vastavat 10, 14 ja 30 aasta jooksul. Arvestades, et sillad projekteeritakse 100 aastase kasutusega, siis nende tsementide puhul kasutusiga tagatud ei ole.

Ülejäänud tsementidega on seis parem. CEM II/A-D ja CEM III/A puhul on kasutusea lõpus kloriidide sisaldus 0,51 ja 0,43 %/c. Kõige paremad tulemused on tsementidega CEM II/A-V ja CEM III/B, mille puhul on kasutusea lõpus kloriidide sisaldus betoonis FIB34 [2] ja FIB76 [3] soovitatud alumise piiri 0,2 %/c lähedal või isegi alla selle, olles vastavalt 0,2 ja 0,12 %/c.

Eelnevatelt joonistelt on selgelt näha, et erinevate tsementide puhul on kloriidide liikumine betoonis erineva kiirusega. Kloriidide seisukohalt on kõige kehvemad tsemendid CEM I ja CEM II/A-LL. CEM I kohta on andmed olemas kolme keskkonnaklassi puhul ja joonistelt tuleb välja, et CEM I tsementi tuleks vältida konstruktsioonides, mis on kuidagigi kloriididega kokkupuutes.

Mudelitest eristuvad tsemendid, mis taluvad kloriide paremini. Kõige paremad tulemused on tsemendi CEM III/B puhul ja seda nii XD1, XD2 kui ka XD3 keskkonnaklassis. Selle tsemendi puhul on 100 aasta möödudes jäänud kloriidide tase betoonis algsele tasemele või tõusnud väga väikesel määral, olles XD1 klassis 0,10 %/c, XD2 klassis 0,14 %/c ja XD3 klassis 0,12 %/c.

Kõigis XD keskkonnaklassides kajastuvad head tulemused lisaks veel tsementidel CEM II/A-D ja CEM II/A-V ning XD3 klassis lisandub CEM III/A. Nende tsementide puhul jääb kriitiline kloriidide tase projekteeritud kasutusea lõpus alla keskmise kriitilise piiri.

3. KLORIIDIDE SISSETUNGIMISE SÜGAVUSE MÕÕTMISE VÄLIKATSED

3.1 Välikatsete meetodika

Kloriidisisalduse sügavuse määramine kivistunud betoonis välikatsete meetodikat kirjeldab standard EVS-EN 14629:2007 [20].

Proovide võtmine peab toimuma vastavalt proovivõtuplaanile. Plaan võtab arvesse [20]:

- ehitise suurus, kuju, asukoht, suund, vanus ja ehituskonstruksioon;
- visuaalsete uuringute tulemused ja muu kättesaadav teave võimaliku halvenemise kohta;
- täitematerjali suurus ja betooni heterogeensus;
- keskkonnatingimused, nt. soolase vee pritsmete tsoonid.

Plaanis määratakse proovide ligikaudne arv, asukoht ja sügavus, sealhulgas sügavuse juurdekasvud. Tavaliselt ei ületa sammud 25 mm. Kohapeal tuleb kontrollida, kas betoon, millest proove võetakse, esindab uuritavaid elemente. Samuti tuleb kindlaks teha armatuuri asukoht, mis ei tohiks proovide võtmise ajal kahjustada saada. [20]

Pulbriproovide puurimisel määratakse puurimisvahendi läbimõõt ja sellest tulenevalt piisava proovikoguse saamiseks vajalike puuraukude arv. Pulber kogutakse eraldi sügavustelt nagu on sätestatud proovivõtukavas. Nõutav on minimaalne proovi suurus umbes 1 g. [20] Laboriga konsulteerides selgus, et soovituslik kogus on 5 g.

Kõik augud või konstruktsiooni kahjustused tuleb kohe parandada või kaitsta, et vältida edasist halvenemist. [20]

3.2 Välikatsete läbiviimine

Enne välikatsete läbiviimist konsulteeriti Transpordiameti Lõuna üksuse Sillainseneriga valimaks välja sildu/viadukte, kus katseid teostada. Valiku kriteeriumiteks said teeklass, rajatise vanus ja rajatise paiknemine soolatataval teel.

Teeklassi puhul jälgiti, et valikusse satuks põhimaanteelt, tugimaanteelt ja kõrvalmaanteelt vähemalt üks rajatis. Rajatiste vanuse kriteeriumiks võeti viis kuni kümme aastat. Sellise valiku puhul on rajatised juba kokku puutunud teesooladega ja samas võis eeldada, et täitedokumentatsioon on korralikult säilinud ja kättesaadav.

Transpordiametist saadud info põhjal sai koostöös juhendajaga tehtud valik järgnevalt:

- TÕRVANDI viadukt 1
- LENNU viadukt
- KINTSLI sild
- SAARE sild

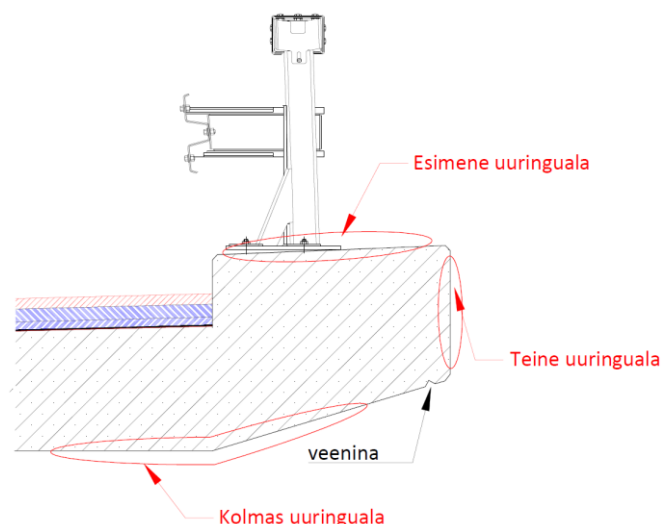
Lisaks tuli enne välikatseid teha Transpordiametile tehniline kirjeldus planeeritavate tööde kohta ja saada sellele kooskõlastus (vt lisa 2).

Välikatsed viidi läbi 12.03.2022 (Kintsli sild ja Saare sild) ja 13.03.2022 (Tõrvandi viadukt 1 ja Lennu viadukt). Katsed viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 14629:2007 [20]. Katsete läbiviijaks oli Germo Ilvesmets (Foto 1).

Puurimised teostati servaprussilt kuna eelduste kohaselt satub kõige rohkem kloriide just sinna. Uuringupunktide paiknemine valiti järgnevalt: esimene punkt servaprussi peal, horisontaalsel pinnal; teine punkt servaprussi küljel, vertikaalsel pinnal; kolmas punkt servaprussi all, horisontaalsel või kaldpinnal veeninast kaugemal (vt joonis 9).

Laborikatsetusteks piisava koguse materjali (5 g) saamiseks puuriti igal sillal kolmes uuringupunktis 3 - 4 auku läbimõõduga 10 mm ja maksimaalse sügavusega 40 mm. Igas uuringupunktis puuriti esialgu 10 mm sügavused augud, mille puru koguti kokku. Vältimaks proovide segunemist puhastati auk ja auguümbrus suruõhuga enne järgmist puurimist sinna jäänud purust. Järgmisena puuriti samad augud 20 mm sügavuseks ja taas koguti puru kokku. Protsessi korrati neli korda kuni augu 40 mm sügavuseni.

Puurimistega kogutud materjal saadeti katsetamiseks Tallinna Tehnikakõrgkooli laborisse.



Joonis 9. Puurimiste asukohad

Peale puurimiste lõppu parandati kõik puuritud augud. Aukude parandamisel jälgiti, et ümbritseva keskkonna temperatuur on üle $+5^{\circ}\text{C}$ ja konstruktsiooni temperatuur vähemalt $+5^{\circ}\text{C}$. Aukude sulgemisel eemaldati lahtised osakesed, puhastati augud suruõhuga ja kontrolliti, et need oleksid kuivad. Seejärel täideti augud varasemalt Transpordiameti poolt kooskõlastuse saanud polüuretaanhermeetik Soudaflex 40 FC-ga. Kogu protsessist tehti fotod ja edastati need Transpordiametile kinnitamaks, et augud on korralikult suletud.

Puuraukude sügavused on toodud lisas 3.



Foto 1. Töö autor välikatset läbi viimas Kintsli sillal

3.3 Uuritavad objektid

3.3.1 Tõrvandi viadukt 1

Tõrvandi maanteeviadukt asub põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa km 186,406, Kambja vallas, Ülenurme alevikus, Tartumaal. Viadukt on projekteeritud Stricto Project OÜ poolt, Projekti nr: S-13-26 [21].

Viadukti üldandmed [22]:

- Silla number 1802
- Ehitusaasta 2015
- vanus 7 aastat
- Normatiivne kandevõime KM3 3600

Projekti järgsed andmed [21]:

- Eluiga >100 aastat,
- Remondivaba eksploatatsioon >50 aastat
- Servaprussides on ettenähtud kasutada raudbetooni C35/45 XC4, XD3, XF4, KK4 + lisand veetiheduse tõstmiseks (näiteks Xypex Admix C-1000NF või Penetron Admix)
- Sarrusterase kaitsekiht minimaalselt 50 mm
- Tekiplaadi servaprussid impregneerida silaani baasil impregneeriga (KemaFOB või analoog)

Täitedokumentatsiooni järgsed andmed [23]:

- Tekiplaat – betoon C35/45, KK4, XC4, XF4, XD3, CEM II/A-T 52,5N
- Servaprussid - C35/45, KK4, XC4, XF4, XD3, Penetron Admix lisandiga (Penetron admix 1% tsemendi kaalust), CEM II/A-T 52,5N
- Impregneer - Granit-28Cure



Foto 2. Tõrvandi viadukt 1

3.3.2 Lennu viadukt

Lennu maanteeviadukt asub põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa km 187,551, Kambja vallas, Ülenurme alevikus, Tartumaal. Viadukti tööprojekti on koostanud OÜ Skeleton, Töö nr P-03-2014 [24].

Viadukti üldandmed [22]:

- Silla number 1805
- Ehitusaasta 2015
- vanus 7 aastat
- Normatiivne kandevõime KM3 3600

Projekti järgsed andmed [24]:

- Eeldatav eluiga – ei ole projektis välja toodud,
- Servaprussides on ettenähtud kasutada raudbetooni C35/45 XD3, XF4, KK4 + servaprusside ülemine osa Penetron Admix lisandiga (või analoog)
- Sarruse nominaalne kaitsekiht 55 mm

Täitedokumentatsiooni järgsed andmed [23]:

- Tekiplaat – betoon C35/45, KK4, XC4, XF4, XD3, CEM II/A-T 52,5N
- Servaprussid - C35/45, KK4, XC4, XF4, XD3, Penetron Admix lisandiga (Penetron admix 1% tsemendi kaalust), CEM II/A-T 52,5N
- Projekti järgi ei olnud vaja impregneerida. Täitedokumentatsioonist selgus, et töövõtja oli servaprusside impregneerinud Granit-28Cure-ga.



Foto 3. Lennu viadukt

3.3.3 Kintsli sild

Kintsli sild asub tugimaantee nr 46 Tatra - Otepää – Sangaste km 20,102, Otepää vallas, Päidla külas, Valgamaal. Silla tööprojekti on koostanud Stricto Project OÜ, Projekti nr: S1709-1 [25].

Silla üldandmed [22]:

- Silla number 974
- Ehitusaasta 2017
- vanus 5 aastat
- Normatiivne kandevõime KM1/KM3 2400

Projekti järgsed andmed [25]:

- Eeldatav eluiga – ei ole projektis välja toodud, hankedokumentide kohaselt 100 aastat
- Tekiplaadi betoon – C35/45 XC4, XD1, XF4, KK4.
- Armatuurikaitsekiht on 50 mm
- Servaprusside pealsed ja välisküljed tuleb katta küllastumiseni ühekomponentse lahustivaba vedela hüdrofobiseerimisvahendiga Emcephob WM (või analoog)

Täitedokumentatsiooni järgsed andmed [23]:

- tekiplaat ja servaprussid – betoon C35/45 XC4, XD1, XF4, KK4. Täitedokumentatsioonis olnud betooni saatelehtedelt ei selgunud kasutatud tsemendi marki.
- Täitedokumentatsioonist ei selgunud, kas või millega servaprussi impregneeriti.



Foto 4. Kintsli sild

3.3.4 Saare sild

Saare sild asub kõrvalmaantee nr 22280 Hammaste – Rasina km 1,268, Kastre vallas, Issaku küla, Tartumaal. Silla põhiprojekti on koostanud OÜ Järelding Inseneribüroo, Töö nr P 291-2 [26].

Silla üldandmed [22]:

- Silla number 581
- Ehitusaasta 2017
- vanus 5 aastat
- Normatiivne kandevõime KM1/KM3 1200

Projekti järgsed andmed [26]:

- Projekteeritav eluiga – 100 aastat,
- Servaprussid – C35/45 XC3; XD3; XF4; KK4
- Sarruse nominaalne kaitsekiht servaprussil 45 mm
- Servaprusside pealsed ja välisküljed impregneerida silaani baasil impregneeriga

Täitedokumentatsiooni järgsed andmed [23]:

- tekiplaat ja servaprussid – betoon C35/45 XC3, XD3 XF4/KK4, CEM II/A-T 52,5N.
- Impregneer - EuroCret HM.



Foto 5. Saare sild

3.4 Uuritavate rajatiste eeldatavad profiilid

Täitedokumentatsioone uurides selgus, et kolmel rajatisel (Tõrvandi viadukt 1, Lennu viadukt ja Saare sild) on kasutatud sama tsemendi – CEM II/A-T. Kintsli silla dokumentides ei olnud kasutatud tsemendi marki kajastatud.

Kasutatud tsemendiga mudeli arvutusi on keeruline teha kuna algandmed on puudulikud. Erinevaid uuringuid analüüsid selgus, et CEM II/A-T puhul ei ole kloriidi migratsioonikoefitsiendi kohta andmeid saada. Samuti ei ole neid kajastatud FIB34 [2] ega FIB76-s [3].

A. Rahimi on oma doktoritöös „*Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung¹*” [27] leidnud, et CEM II/A-T vananemise eksponent α keskkonnaklasside XD2 ja XD3 puhul on 0,40 standardhälbega 0,16. Samuti märgib Rahimi ära, et tegu on tsemendi koostise põhjal eeldatud väärtusega.

Sama väärtust kajastavad oma uurimuses „*Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke*” ka Sylvia Keßler ja Christoph Gehlen ² [28].

¹ Pooltõenäosusliku kontrolli kontseptsioon raudbetoonkomponentide vastupidavuse projekteerimiseks ja hindamiseks kloriidi mõjul - autori poolne tõlge

² Mudeliparameetrite mõju uuringud sillakonstruktsioonide eluea prognoosile – autori poolne tõlge.

Kuna CEM II/A-T on lähteandmed puudulikud, siis arvutuste teostamiseks valiti kloriidide migratsioonikoefitsiendiks CEM II/A-D ja CEM II/A-V vastavad näidud, kuna nende kohta on info olemas nii XD1 kui ka XD3 keskkonnaklassi puhul. Samuti esitavad need tsemendid migratsioonikoefitsiendi madalamat ja kõrgemat väärtust.

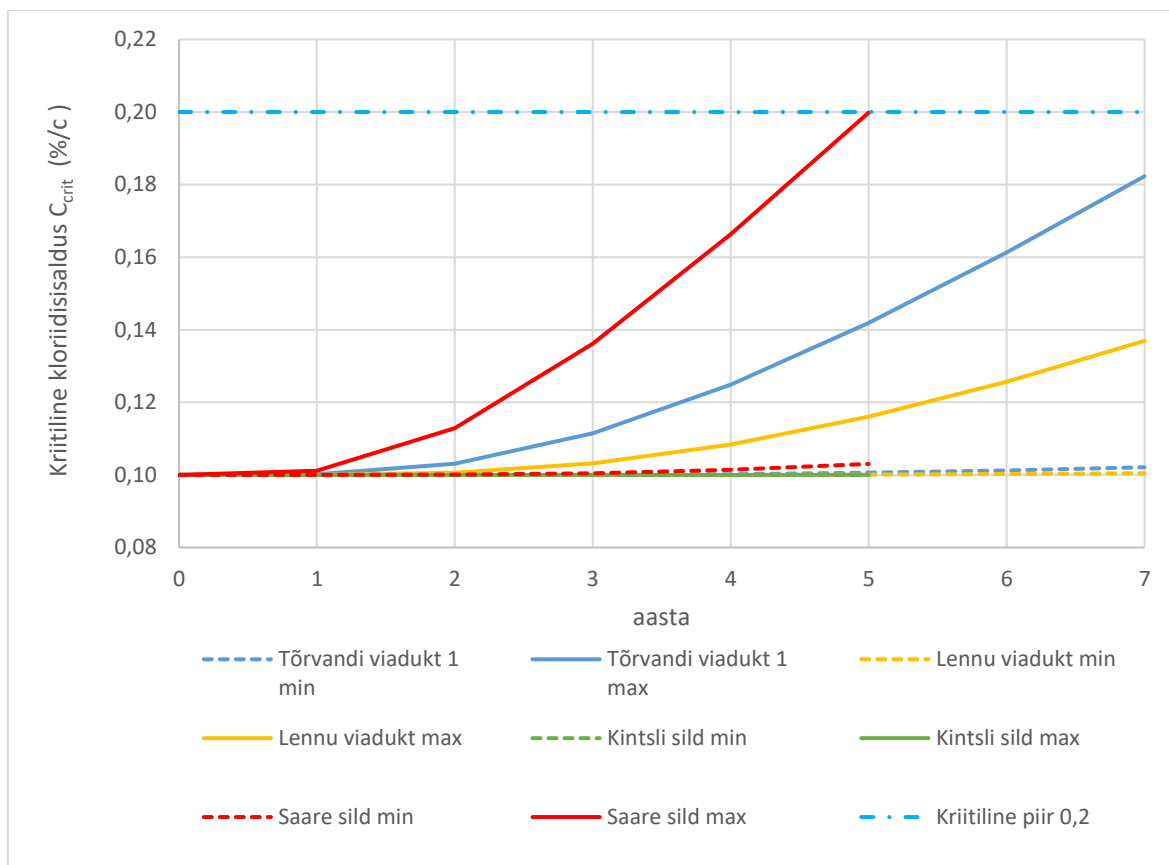
Vananemise eksponendi α väärtuseks võeti XD1 klassis vastavalt tabelile 13 - 0,65 ja XD3 klassis 0,40 vastavalt A. Rahimi doktoritööle [27]. Ülejäänud kasutatud andmed on koondatud tabelitesse 16 ja 17.

Tabel 16. Rajatiste lähteandmed

	Tõrvandi viadukt 1	Lennu viadukt	Kintsli sild	Saare sild
Vanus (aastat)	7	7	5	5
Betooni klass	C35/45			
Vesitsementtegur w/c**	0,45		0,55	0,45
Keskkonnaklass	KK4, XC4, XF4, XD3*	XC4, XD1, XF4, KK4	XC3, XD3 XF4/KK4	
Tsemendi liik	CEM II/A-T 52,5N		teadmata	CEM II/A-T 52,5N
Betooni kaitsekiht , mm	50	55	50	45
*Penetron Admix lisandiga (Penetron admix 1% tsemendi kaalust)				
** kuna saatelehtedel puudus vastav info, siis eeldatud maksimaalne vastavalt keskkonnaklassile				

Tabel 17. Kloriididest põhjustatud korrosiooni mudeli lähteandmed uuritavatel rajatistel

Parameeter		Ühik	Kirjeldus	Keskvärtus	
D_{APP(t)}	D _{RCM,0}	mm ² /a	Kloriidi migratsioonikoefitsient	Tabel 11*	
	α	-	Vananemise eksponent	0,40 ja 0,65	
	t ₀	aastat	Referentsaeg	0,0767	
	k _e	b _e	K	Temperatuurikoefitsient	4800
		T _{ref}	K	Referentstemperatuur	293
T _{real}		K	Konstruksiooni elemendi temperatuur	279,75	
C _{S,Δx}		%/c	Kloriidisisaldus sügavusel Δx ajal t	Tabel 9	
Δx		mm	Konvektsioonitsooni sügavus	Tabel 10	
C ₀		%/c	Esialgne kloriidisisaldus betoonis	0,1	
C _{crit}		%/c	Kriitiline kloriidisisaldus	0,2**	
a		mm	Betooni kaitsekiht	Tabel 16	
* kasutatud CEM II/A-D ja CEM II/A-V näitusid					
** kuna uuritavad rajatised on suhteliselt uued (5-7 aastat), siis kasutatakse joonise parema loetavuse nimel FIB34 [2] ja FIB76 [3] kloriidide sisalduse soovitatud alumist piiri 0,2 %/c.					

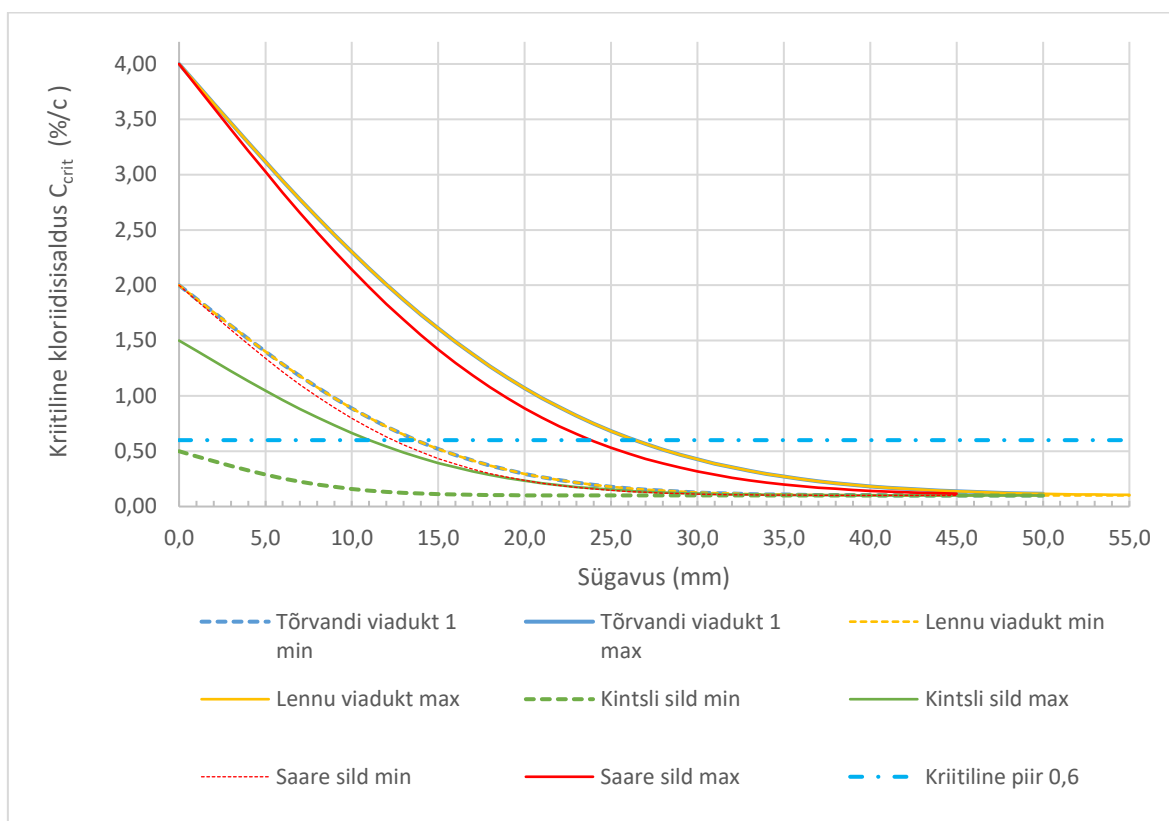


Joonis 10. Uuritavate rajatiste eeldatavad minimaalsed ja maksimaalsed kloriidisisaldused armatuuri sügavusel.

Joonisel 10 on kujutatud uuritud rajatiste eeldatavad kloriidisisalduse maksimaalsed ja minimaalsed profiilid armatuuri sügavusel. Kuna Kintsli sild on ainukesena projekteeritud keskkonnaklassi XD1, siis on näha, et selle eeldatav maksimaalne kloriidide sisaldus on praktiliselt esialgse kloriidisisalduse juures. Autori arvates see tõenäoliselt päris nii ei ole, kuna sild paikneb soolatatav teel ja vähemalt silla servapruss paikneb XD3 keskkonnaklassis. Seega võib peale laborikatsetulemuste analüüsimist selle silla puhul olla esialgse arvutusetega kõige suuremad erinevused.

Tõrvandi viadukt 1 ja Lennu viadukt on ehitatud samal aastal, seega on sama vanad. Mõlemad rajatised on projekteeritud keskkonnaklassi XD3 ja ehitamisel on betooni valmistamiseks kasutatud sama tsementi. Kahe viadukti ainuke erinevus on betooni kaitsekihi paksuses ja see kajastub ka joonisel. Kui kloriidide sisalduse minimaalse näidu profiilid on väga väikese erinevusega, siis peamine erinevus tuleb välja eeldatud maksimaalse kloriidisisalduses. Lennu viaduktil on see $\sim 0,137$ %/c ja Tõrvandi viaduktil $\sim 0,182$ %/c.

Arvutuste järgi peaks kõige kehvem seis olema Saare sillal. Kuigi sild on ainult viis aastat vana, siis arvutuste järgi on kehvemal juhul juba saavutatud FIB34 [2] ja FIB76 [3] soovitatud kriitilise kloriidisisalduse alumine piiri 0,2 %/c. See tähendab, et kehvemal juhul on alanud armatuuri roostetamine. Samas ei tohi unustada, kuna kasutatud tsemendi CEM II/A-T kohta ei ole andmeid saada, siis on arvutustes saadud kõige kehvem tulemus tsemendiga CEM II/A-V. Laboritulemusi analüüsid selgub, kas olukord on juba nii kehv või mitte.



Joonis 11. Uuritavate rajatiste eeldatavad minimaalsed ja maksimaalsed kloriidisisaldused.

Joonisel 11 on kujutatud uuritud rajatiste eeldatavad kloriidisisalduse maksimaalsed ja minimaalsed profiilid. Kuna sillad on suhteliselt uued, viis ja seitse aastat, siis ei arvestatud XD3 keskkonnaklassi arvutustes konvektsioonitsooni sügavust. Mudelist on näha, et peamised erinevused tulenevad kasutatud betooni pinna kloriidisisalduse väärtustest ja vanusest. Betooni pinna kloriidisisalduse väärtused vastavalt FIB76 [3] soovitusele on keskkonnaklassis XD3 minimaalselt 2,0 %/c ja maksimaalselt 4,0 %/c ja XD1 klassis vastavalt 0,5 %/c ja 1,5 %/c.

Kuna Tõrvandi viadukt 1 ja Lennu viadukt on täpselt sama vanad ja on projekteeritud mõlemad XD3 keskkonnaklassi, siis nende profiilid kattuvad täpselt. Nende rajatiste

puhul on kriitiline kloriidisisaldus 0,6 %/c maksimaalsel juhul 27 mm sügavusel ja minimaalne 14 mm sügavusel. Saare silla puhul on need näitajad vastavalt 24 mm ja 13 mm. Arvestades, et need sillad/viaduktid on alla 10 aasta vanused ja kloriidide kriitiline tase on umbes poole peal projekteeritud kaitsekihise, siis võib arvestada, et kehvemal juhul hakkab armatuur roostetama ca 15. aastal ja Saare sillal lausa 10. aastal.

Kuna Kintsli sild on projekteeritud XD1 keskkonnaklassi, siis saame mudelist, et selle puhul on kriitiline kloriidisisaldus maksimaalsel juhul 11 mm sügavusel ja minimaalsel juhul ei ole betooni pinnal isegi kriitilist kloriidisisaldust saavutatud jäädes 0,5 %/c juurde.

4. ANALÜÜS JA SOOVITUSED EDASPIDISEKS

Töö autori ja juhendaja teada teostab Eestis kloriidioonide kontsentratsiooni määramist betoonis ainult üks labor, Tallinna Tehnikakõrgkooli labor. Lõputööga alustades oli teada hinnanguline proovide kogus, mida on vaja katsetada. Seega sai tellimus kohe aasta alguses laborile esitatud. Katsetuste teostamiseks on vajalik kalibreerimisvedelik ja ekstraheerimisvedelik, mille varud olid laboril aga lõppenud. Vajalike materjalide tellimus anti sisse juba veebruarikuus. Töö autor teostas uuritavatel rajatistel katsetamiseks vajaliku betoonipuru kogumise 12. ja 13. märtsil, peale mida need edastati laborisse. Aga tulenevalt olukorrast maailmas, kus Venemaa tungis 24. veebruaril 2022 sõjaliselt Ukraina territooriumile, on muutunud palju. Kloriidide määramiseks vajalikud vedelikud ei olnud Ameerika Ühendriikidest 20. mai 2022 seisuga veel Eestisse jõudnud. Seega kahjuks ei olnud andmeid mida analüüsida.

Arutanud tekkinud olukorda juhendajaga selgus, et 2015. aastal on teostatud Umbsaare raudteeviaduktile (nr 883) Tallinna Tehnikakõrgkooli poolt raudbetoonkonstruktsioonide uuringud [29], mille käigus teostati piisavalt palju (kokku 20 mõõtepunkti) kloriidide sisalduse mõõtmisi betoonis. Seega otsustati analüüsida neid andmeid ja anda soovitused edaspidiseks prognoosimudeli valideerimiseks.

Käesolevas peatükis analüüsitakse Umbsaare viaduktil 2015 teostatud uuringute andmeid ja nende ühtimist prognoosimudelitega.

4.1 Umbsaare raudteeviadukt

Umbsaare raudteeviadukt asub põhimaantee nr 2 Tallinn - Tartu - Võru – Luhamaa km 254.251, Võru vallas, Umbsaare külas, Võrumaal.

Viadukti üldandmed [22]:

- Silla number 883
- Ehitusaasta 1989
- Vanus 33 aastat
- Renoveeritud 2002 – servaprussid, vanus 20 aastat



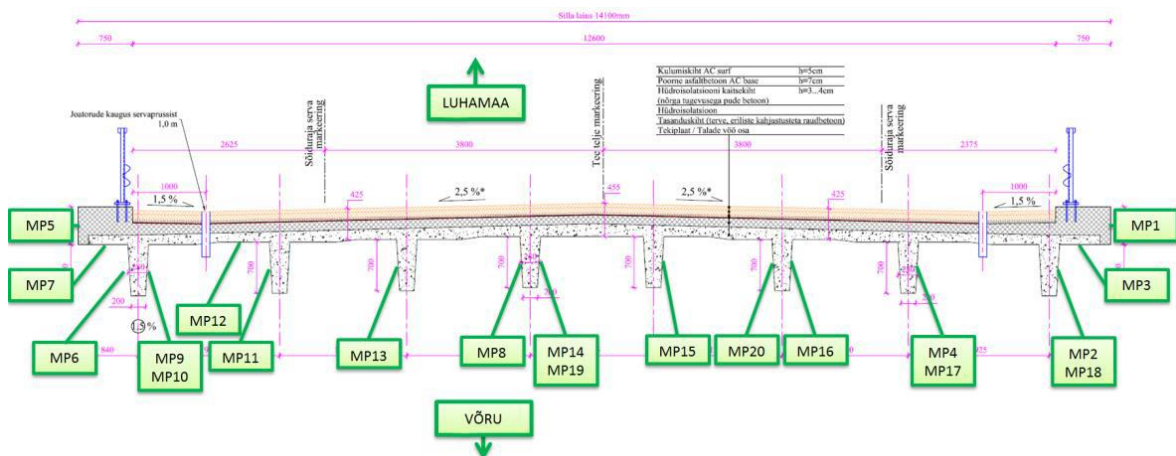
Foto 6. Umbsaare viadukt [29]

4.1.1 Umbsaare raudteeviadukti raudbetoonkonstruktsioonide uuring

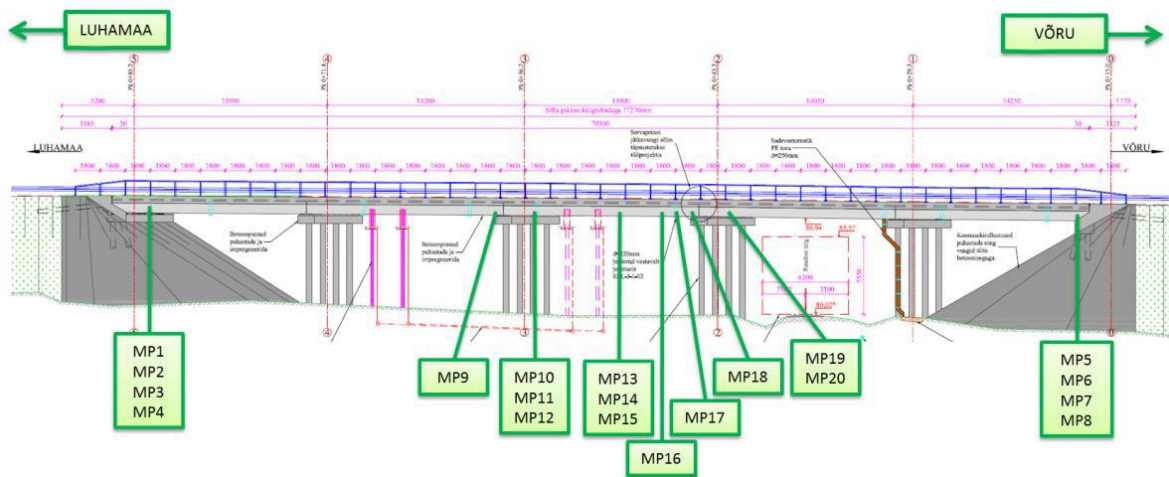
Tallinna Tehnikakõrgkooli „Umbsaare raudteeviadukti (nr 883) raudbetoonkonstruktsioonide uuringud“ (edaspidi Uuring) käigus teostatud mõõtepunktide asukohad on toodud joonistel 12 ja 13 ning tabelis 18.

Mõõtmised teostati järgnevatel kohtades [29]:

- peatala külg – mõõtepunktid 2, 4, 6, 8...11 ja 13...20;
- peatala plaadiosa alumine pind – mõõtepunktid 3, 7 ja 12;
- servaprussi külg – mõõtepunktid 1 ja 5.



Joonis 12. Mõõtmispunktide skemaatilised asukohad viadukti ristlõikel [29]



Joonis 13. Mõõtmispunktide skemaatilised asukohad külgsuunal [29]

Uuringu käigus teostati betooni kloriidide sisalduse mõõtmised seadmega C-CL-3000 Chloride Test System (foto 7). Mõõtmistel lähtuti standardist EVS-EN 14629:2007 [20] (Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of chloride content in hardened concrete). [29] Mõõtmiste tulemused on toodud tabelis 18.



Foto 7. Betooni kloriidide sisalduse määramine seadmega C-CL-3000 Chloride Test System [29]

Tabel 18. Uuringu mõõtmistulemused [29] (autori kohandatud)

Mõõtepunkti number	Element ja mõõtepunkti asukoht elemendil	Kloriidide hulk betoonis [%]
1	Servaprussi külg	0,253
2	Tala T8/5 külg	0,202
3	Plaadi alumine pind	0,187
4	Tala T7/5 külg	0,061
5	Servaprussi külg	0,467
6	Tala T1/1 külg	0,255
7	Plaadi alumine pind	0,380
8	Tala T4/1 külg	0,065
9	Tala T1/4 külg	0,412
10	Tala T1/3 külg	0,154
11	Tala T2/3 külg	0,012
12	Plaadi alumine pind	0,090
13	Tala T3/3 külg	0,176
14	Tala T4/3 külg	0,046
15	Tala T5/3 külg	0,042
16	Tala T6/3 külg	0,075
17	Tala T7/3 külg	0,052
18	Tala T8/3 külg	0,066
19	Tala T4/2 külg	0,058
20	Tala T6/2 külg	0,036
Tabelis on kasutatud tulemuste paremaks esiletoomiseks järgmisi värve:		
	■ mõõtetulemused jäävad lubatud piiridesse	
	■ mõõtetulemused viitavad probleemsele väärtusele	
	■ mõõtetulemused ületavad arvestatavalt lubatud väärtust	

Tabelis 18 toodud tulemustele hinnangu andmiseks on Uuringu teostajad aluseks võtnud standardis EVS-EN 206:2014 [4] toodud terrassarrust sisaldava betooni kloriidisisalduse maksimaalse piirmäära tsemendi massist 0,20...0,40%. Sellest tulenevalt on võetud kriitiliseks kloriidide hulgak betoonis 0,03...0,06% [29].

Lõputöö autor sellise lähenemisega ei nõustu. EVS-EN 206:2014 [4] rakendub monoliitsete ja monteeritavate konstruktsioonide ning hoonete ja rajatiste betonelementide valmistamisel kasutatavale betoonile [4]. Seega võib öelda, et vastavad piirmäärad on seatud värskest toodetud betoonile, mitte teatud aja keskkonnaklassis viibinud betoonile. Selliselt kajastades võib jääda ekslik mulje, et konstruktsioonid on kloriidide suhtes tegelikult kehvemas seisus.

Autor leiab, et tulemuste hindamisel tuleb aluseks võtta FIB34 [2] ja FIB76 [3] soovitus, mis annab kriitilise kloriidisisalduse keskmise väärtusega 0,6% tsemendi massist standardhällbega 0,15 (vt. ptk. 1.2.2).

4.1.2 Lähteandmed

Umbsaare viaduktile kõige lähem meteoroloogiajaam asub Võrus ja selle jaama keskmised temperatuurid on toodud tabelis 19. Aasta keskmise õhutemperatuuri $T_{real}=6,5^{\circ}\text{C}=279,65\text{ K}$ korral on parameeter $k_e=0,457$.

Tabel 19. Võru meteoroloogiajaama keskmine õhutemperatuur ($^{\circ}\text{C}$) 1991-2020 [30]

	Kuud												Keskmine
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Võru	-4,2	-4,5	-0	6	12	16	18	17	12	6	1,3	-2	6,5

Uuringu aruandest ei selgu, kui sügavad augud puuriti proovide võtmiseks. Toodud on, et armatuuri kaitsekihi paksus on 0-30mm. Seega eeldame, et puuriti maksimaalse kaitsekihi paksuselt ja sellisel juhul on keskmine sügavus 15mm.

Vastavalt joonistel 12 ja 13 toodud mõõtepunktide asukohtadele on igale mõõtepunktile määratud eeldatav keskkonnaklass. Kloriididele avatud konstruktsiooniosad määrati keskkonnaklassi XD3 (servaprussid ja äärmiste talade välimised küljed). Uuringus oli eraldi välja toodud, et joa- ja tilktorud on liiga lühikesed. Ning fotodelt on näha, et sealt kaudu on vesi pääsenud konstruktsioonidele. Seetõttu arvestati XD3 klassi ka konstruktsioonid, mis paiknesid joa- või tilktorude lähedal. Ülejäänud konstruktsioonid paiknevad keskkonnaklassis XD1. Mõõtepunktide keskkonnaklassid on toodud tabelis 21.

Arvutustes eeldatakse, et kasutatud tsemendi tüüp on CEM I. Konstruktsioonid, mis on ehitatud 1989. aastal, andmed on võetud raudbetoon tüüptalade kataloogist nr 56 ja 2002. aastal ehitatud servaprusside betooni andmed vastavalt EVS-EN 206 [4] toodule.

Kasutatud lähteandmed on koondatud tabelitesse 20 ja 21.

Tabel 20. Umbsaare viadukti lähteandmed

Parameeter		Ühik	Kirjeldus	1989		2002	
		aastat	Vanus ¹⁾	33 (26)		20 (13)	
		kg/m ³	Tsemendi kogus	350 ²⁾		340 ³⁾	
		%/c	Vesitsementtegur w/c	0,5 ²⁾		0,45 ⁴⁾	
			Keskkonnaklass	XD1	XD3	XD3	
			Tsemendi liik	CEM I			
D _{APP(t)}	D _{RCM,0}	mm ² /a	Kloriidi migratsioonikoefitsient	498,6		315,6	
	α	-	Vananemise eksponent	0,65	0,3	0,3	
	t ₀	aastat	Referentsaeg	0,0767			
	k _e	b _e	K	Temperatuurikoefitsient	4800		
		T _{ref}	K	Referentstemperatuur	293		
		T _{real}	K	Konstruksiooni elemendi temperatuur	279,65		
D _{APP(t)}		Kloriidi difusioonikoefitsient	5,17	39,72	30,96		
k _e		difusiooni temperatuurisõltuvuse parameeter	0,457				
k _t		ülekandeparameeter	1				
Δx	mm	Konvektsioonitsooni sügavus	0	10	10		
C ₀	%/c	Esiadne kloriidisisaldus betoonis	0,2 ⁵⁾				
C _{crit}	%/c	Kriitiline kloriidisisaldus	0,6				
a	mm	Betooni kaitsekiht	0 - 30 (keskmise 15)				
C _{S,Δx}	%/c	Betooni pinna kloriidisisaldus	min	0,5	2	2	
			max	1,5	4,0	4,0	

¹⁾ sulgudes on toodud konstruksiooni vanus Uuringu teostamise ajal

²⁾ vastavalt Raudbetoon tüüptalade kataloog „Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 – дополнения“, Moskva 1962 [31]

³⁾ tulenevalt keskkonnaklassist on minimaalne tsemendisisaldus 320 kg/m³, kuna servapruss kuulub ka keskkonnaklassi XF4, siis on kasutatud sellele klassile vastavat väärtust.

⁴⁾ Vastavalt EVS-EN 206:2014 [4]

⁵⁾ Kasutatud on EVS-EN 206:2014 [4] järgset väärtust kuna Transpordiamet (endine Maanteeamet) on juhendis „Teetööde tehnilised kirjeldused“ [15] esimest korda maininud maksimaalset kloriidisisaldust alles 2016 aasta versioonis. Varasemates juhendites see puudus.

Tabel 21. Mõõtepunktide andmed

Mõõtepunkti number	Element ja mõõtepunkti asukoht elemendil	Keskkonnaklass	Kloriidide hulk tsemendist*
			%/c
1	Servaprussi külg	XD3	1,71
2	Tala T8/5 külg	XD3	1,33
3	Plaadi alumine pind	XD3	1,23
4	Tala T7/5 külg	XD3	0,40
5	Servaprussi külg	XD3	3,16
6	Tala T1/1 külg	XD3	1,68
7	Plaadi alumine pind	XD3	2,50
8	Tala T4/1 külg	XD1	0,43
9	Tala T1/4 külg	XD3	2,71
10	Tala T1/3 külg	XD3	1,01
11	Tala T2/3 külg	XD3	0,08
12	Plaadi alumine pind	XD1	0,59
13	Tala T3/3 külg	XD1	1,16
14	Tala T4/3 külg	XD1	0,30
15	Tala T5/3 külg	XD1	0,28
16	Tala T6/3 külg	XD1	0,49
17	Tala T7/3 külg	XD3	0,34
18	Tala T8/3 külg	XD3	0,43
19	Tala T4/2 külg	XD1	0,38
20	Tala T6/2 külg	XD1	0,24

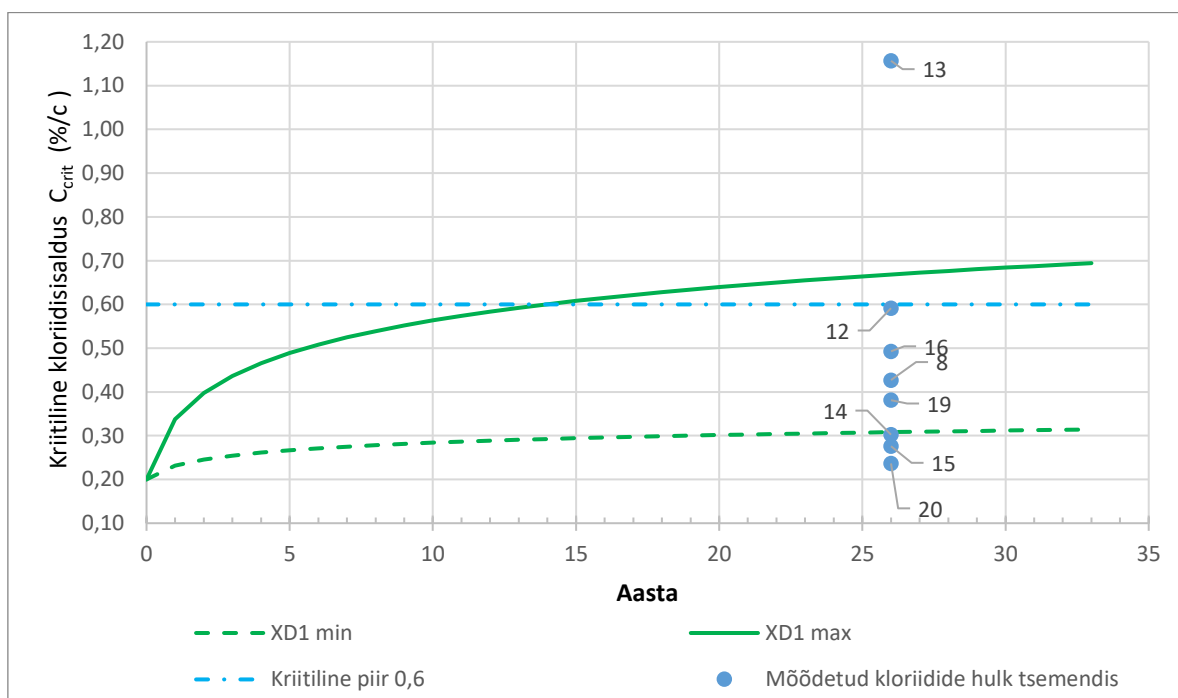
*autori arvutatud vastavalt tabelis 18 ja 20 toodud andmetele

4.2 Umbsaare viadukti mõõtetulemuste analüüs

Joonisel 14 on kujutatud Umbsaare eeldatavad kloriidisisalduse maksimaalsed ja minimaalsed profiilid ja mõõtetulemused 15 mm sügavusel keskkonnaklassis XD1. Mõõtetulemused on kajastatud aastal 26, kuna Uuringu teostamise ajal oli konstruktsiooni vanus selline.

Jooniselt on näha, et mõõtepunktid jäävad suhteliselt ilusti mudeli minimaalse ja maksimaalse vahele. Mõõtepunktide 15 ja 20 puhul isegi alla minimaalset profiili. Samuti jäävad kõik punktid peal ühe kloriidide kriitilisest piirist allapoole. Mõõtepunkt 12 on tulemusega 0,59 %/c küll piirile väga lähedal.

Anomaalia punkti 13 tulemusega on huvitav. Kui vaadata punkti paiknemist, siis ei ole kahtlust, et tegu on XD1 keskkonnaklassi kuuluva punktiga, kuna asub ühel keskmistest taladest ja lähedal ei ole ka joa- ega tilktoruseid. Selline suur kloriidide sisaldus saab olla tingitud hüdroisolatsiooni läbijooksmisest. Uuringus on toodud foto mõõtepunktist 13 (vt foto 8). Fotolt ei ole nähtavaid kloriidikahjususi tuvastada. Samas on Uuringus välja toodud, et peataladel vertikaalsuunalised paindepraod, mis ulatuvad kuni sillateki plaadini. Tõenäoliselt satuvadki kloriidid nende kaudu konstruktsiooni.



Joonis 14. Umbsaare viadukti XD1 keskkonnaklassi eeldatavad kloriidiprofiilid ja mõõtetulemused 15 mm sügavusel.

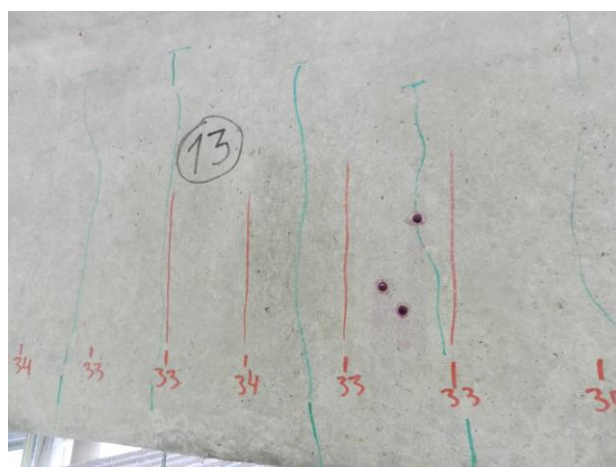
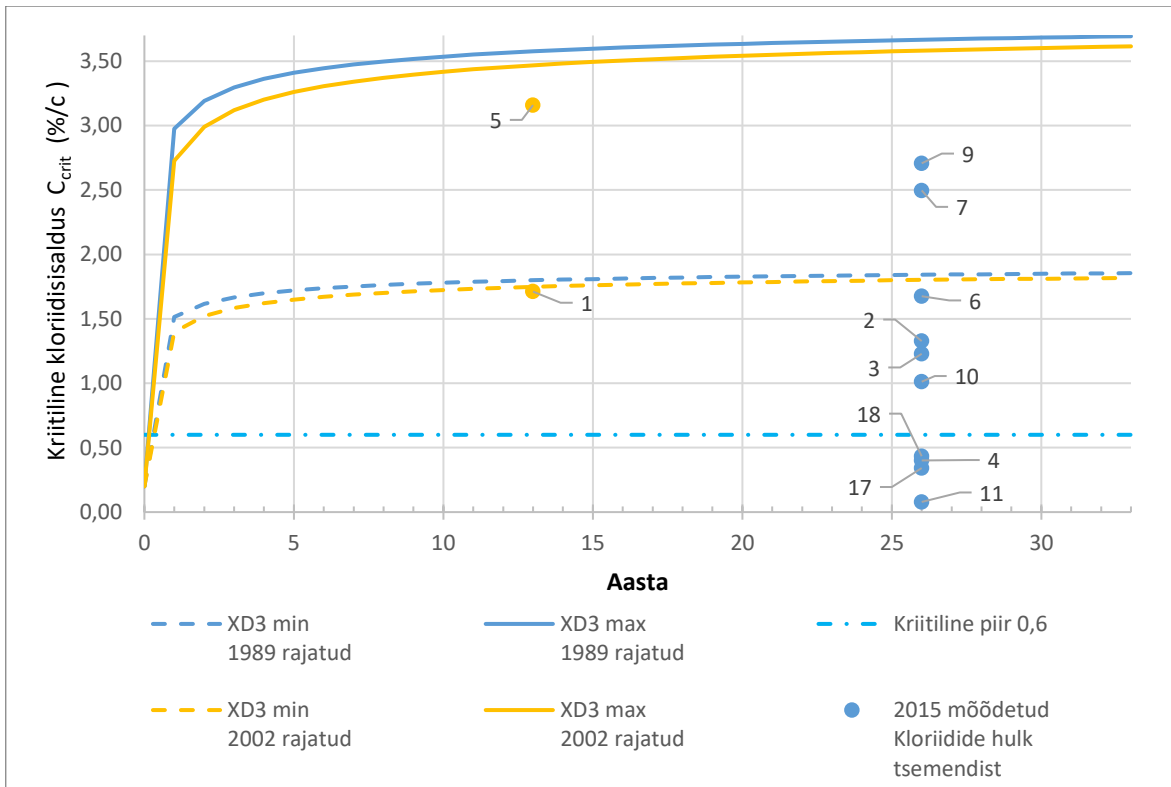


Foto 8. Peatalade vertikaalsuunalised paindepraod talal T3/3 (tähistatud rohelise värviga), mis ulatuvad kuni sillateki plaadini [29]



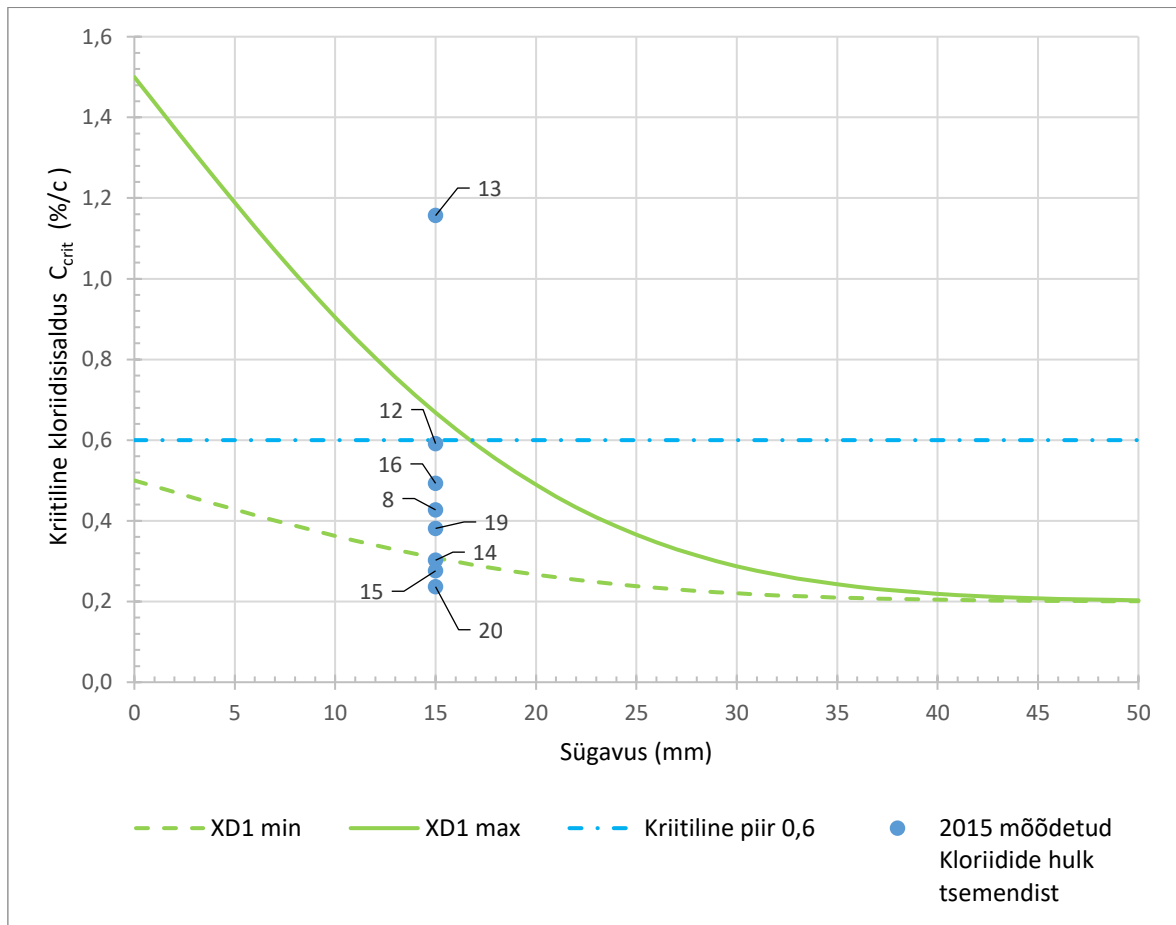
Joonis 15. Umbsaare viadukti XD3 keskkonnaklassi eeldatav kloriidiprofiilid ja mõõtetulemused 15 mm sügavusel.

Joonisel 15 on kujutatud Umbsaare eeldatavad kloriidisisalduse maksimaalsed ja minimaalsed profiilid ja mõõtetulemused 15mm sügavusel keskkonnaklassis XD3. Renoveeritud konstruktsioonide mõõtetulemused on kajastatud aastal 13 ja ülejäänud aastal 26.

Jooniselt on näha, et renoveeritud konstruktsiooni punktid jäävad profiiljoonte vahele, kuigi punkt nr 1 on praktiliselt minimaalse joone peal. Vanemate konstruktsioonide puhul on enamus punkte isegi allpool minimaalset profiili, ainult punktid 7 ja 9 on profiilide vahel. Seega võib öelda, et seis on eeldatust isegi parem, kuna mudeli prognoosi kohaselt peaks olukord veel kehvem olema. Kui vaadata kriitilist piiri, siis ainult kolm punkti jäävad alla selle. Seega võib arvata, et ülejäänud kohtades on armatuuril juba korrosioonioht. Punktid 4, 17 ja 18 jäävad alla kriitilise piiri tõenäoliselt tänu selle, et vastavad punktid on määratud XD3 keskkonnaklassi sellepärast, et paiknevad joa- või tilktorude lähedal, aga viimastest ei ole konstruktsioonidele sattunud nii palju kloriide.

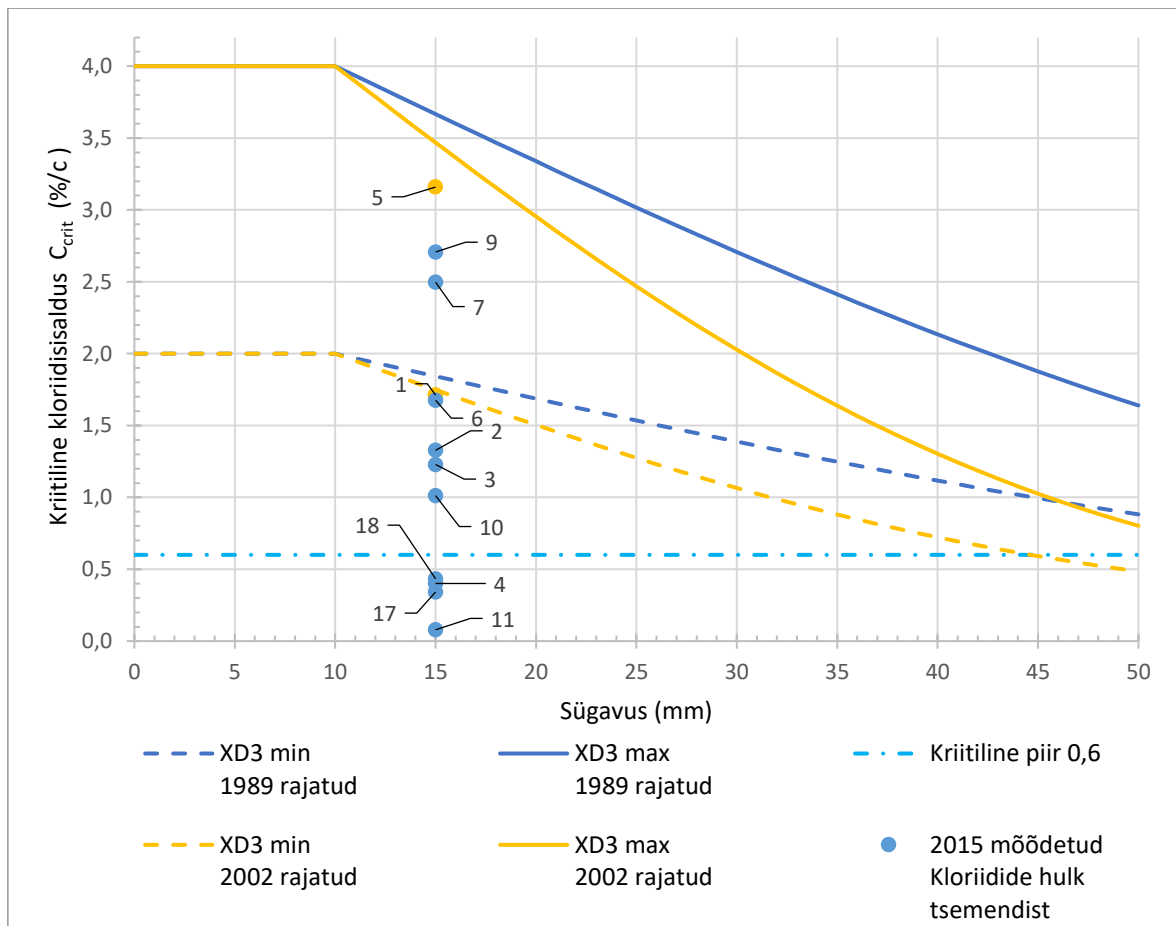
Kui vaadelda punkte 2, 3, 6 ja 10, siis need jäävad miinimum profiili ja kriitilise piiri vahele. Kui nende punktide keskkonnaklassiks määrata XD1, siis jäävad nad tugevalt

üle maksimaalset profiili. Seega võib öelda, et antud punktide kirjeldamiseks ei ole sobivat keskkonnaklassi.



Joonis 16. Umbsaare viadukti eeldatavad minimaalsed ja maksimaalsed kloriidisisaldused 26 aastal keskkonnaklassis XD1.

Joonisel 16 on kujutatud Umbsaare viadukti maksimaalsed ja minimaalsed kloriidiprofiilid 26. aastal. Nagu juba joonisel 14 oli näha paistab ka siit, et mõõtepunktid jäävad valdavalt eeldatud profiilide vahele. Anomaalia punktiga 13 tuleb ka siin välja, kus kloriidisisalduse väärtus on 1,16%/c. Kõige parem seis on mõõtepunktis 12, kus tulemus on 0,24%/c.



Joonis 17. Umbsaare viadukti eeldatavad minimaalsed ja maksimaalsed kloriidisisaldused 13 ja 26 aastal keskkonnaklassis XD3.

Joonisel 17 on kujutatud Umbsaare viadukti maksimaalsed ja minimaalsed kloriidiprofiilid 13 ja 26. aastal XD3 keskkonnaklassis. Nagu jooniselt näha on kõik punktid allpool maksimaalset profiili ja enamus mõõtepunkte isegi allpool minimaalset profiilijoont. Sellest hoolimata on kloriidide sisaldus liiga suur, 2/3 mõõtepunkte hulgas üle kriitilise piiri. See on tingitud kasutatud tsemendi tüübist CEM I. Järeldusele, et CEM I ei sobi kloriididega kokkupuutuvasse keskkonnaklassi, jõuti ka peatükis 2.3.

Nagu Umbsaare viadukti mudelite ja reaalse mõõtetulemuste võrdlusel on näha, lähevad mõõtetulemused ja prognoosimudel üldiselt hästi kokku. Peamised erinevused tulenevad keskkonnaklassi tõlgendamisest, sest sellest sõltuvad mudelites kasutatavad betooni pinna kloriidisisalduse ning vananemise eksponendi väärtused. Neist suuremat mõju avaldab just viimane, sest XD1 keskkonnaklassi puhul on see 0,65, aga XD3 keskkonnaklassis sõltub väärtus tsemendi tüübist. See võib põhjustada olukorra, kus osad mõõtepunktid jäävad nõ kahe klassi vahele, olles XD3 klassi miinumist tugevalt allpool aga samas XD1 klassi maksimumist jällegi palju kõrgemal.

4.3 Soovitused edaspidiseks

Käesolevas peatükis annab autor mõningad soovitused edaspidiseks:

- On näha, et kloriidid on Eesti tingimustes probleemiks ja rajatised ei pea projekteeritud 100 aastat ilma ettenägemata remondita vastu, seega tuleb rohkem tähelepanu pöörata betooni kloriidikindlusele. Selge on, et CEM I, CEM II/A-S ja CEM II/A-LL ei sobi kloriididega kokkupuutuvasse keskkonnaklassi.
- Otsustamaks, millise sideainega betoon on sobiv, tuleb hinnata betooni vastupanu kloriididele vastavalt EVS-EN 12390-18:2021 [18] (Testing hardened concrete - Part 18: Determination of the chloride migration coefficient) või EVS-EN 12390-11:2015 [17] (Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion).
- Tulemuste tõlgendamisel ei ole õige aluseks võtta betooni tootmisel määratletud piirväärtuseid, vaid selleks tuleb kasutada FIB34 [2] ja FIB76 [3] soovituslikku väärtust, mida saab piisavalt kirjeldada keskmise väärtusega $C_{crit} = 0,6 \text{ \%}/c$ ($\%/tsement$), standardhällbega 0,15, kasutades alumiseks piiriks $C_{crit} = 0,2 \text{ \%}/c$ ja ülemiseks piiriks $C_{crit} = 2,0 \text{ \%}/c$ [2, 3].
- Prognoosimudelite koostamisel on vajalik parema ülevaate saamiseks kasutada kindlasti alumist ja ülemist piirväärtust keskväärtuse asemel.
- Peale rajatise valmimist, näiteks kümnendal aastal, teostada kloriidide mõõtmised betoonis, et kindlaks teha, kuidas konstruktsioonid on vastavas keskkonnas käitunud ja näha kuidas kloriidid on juba betoonis liikunud. Betooni hindamiseks tuleb katsetusteks proove võtta erinevatest kohtadest, mitte ainult servaprussist.
- Umbsaare viadukti näitel on näha, et keskkonnaklassid ei ole betooni kvaliteedi hindamiseks kõige parem variant, vaid hinnata tuleb betooni ennast. Täpsema prognoosimudeli saamiseks tuleb proove võtta erinevatelt sügavustelt ja kindlasti aukude sügavused mõõta. Selliselt saab täpsemini koostada antud keskkonnas oleva betooni vastupanu prognoosimudeli ning hinnata, millal hakkab armatuur roostetama.
- Tulenevalt asjade kehvast kokkulangemisest ja asjaolust, et käesoleva töö raames on juba neljalt sillalt/viaduktil proovid võetud ning laborisse saadetud, siis soovitab töö autor teemat kindlasti edasi uurida. Selleks on soovitus leida

veel rajatise, kus on betooni valmistamiseks kasutatud tsementi CEM II/A-T ja neilt proove võtta. Rohkemate proovide tulemuste pealt saab täpsemalt välja arvutada migratsioonikoefitsiendi, mille kohta hetkel andmed täielikult puuduvad.

- Soovituslik protsess:
 1. Konsulteerimine rajatise omanikuga (nt. Transpordiamet, KOV), milliseid objekte valida ja mis tingimustel puurida tohib.
 2. Tutvumine projektdokumentatsiooniga, mis betooni on ettenähtud kasutada, mis keskkonnaklassi on konstruktsioonid projekteeritud, nominaalsed kaitsekihid, eeldatav eluiga jms.
 3. Tutvumine täitedokumentatsiooniga (saatelehed, kaetudtööde aktid, päevikud), sest võib selguda, et ehituse käigus on midagi muudetud, kasutatud näiteks teist betooni vms.
 4. Katsetuskohtade paika panemine.
 5. Proovide väga täpne markeerimine (proovivõtu asukoht, sügavus, järjekorra number jms). Mõistlik on seda teha enne objektile minekut, siis on välitöödel lihtsam.
 6. Kontrollimine, et proovide võtmiseks ja tööde teostamiseks on kõik vajalikud asjad olemas: vest, kiiver, kaitseprillid, nihik, trell, puur, pintsel, suruõhk, nõud proovide kogumiseks (arvesta, et proove tuleb koguda ka alt ülesse puurides), redel, aukude sulgemiseks vajalikud materjalid (rajatise omanikuga varasemalt kooskõlastatud).

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli uurida keskkonnaklassist tingitud kloriidide sissetungimist betooni ja betooni vastupanu kloriidide sissetungimisele. Lisaks analüüsida sillal teostatud katseid ja sellest tulenevalt anda soovitusi prognoosimudelite täpsustamiseks, mis võimaldaks tulevikus sildade kestvust täpsemini hinnata.

Töö esimeses peatükis tutvustati kloriididest tingitud keskkonnaklasse, betoonkaitsekihi määramist ja tulenevalt keskkonnaklassist ning standardite soovitustest betoonile esitatavaid piirväärtuseid. Samuti tutvustati kloriidide sissetungimissügavuse prognoosimudelit ja selle elemente vastavalt Rahvusvahelise konstruktsioonibetonide föderatsiooni (fib) poolt avaldatud juhiste.

Teises peatükis analüüsiti kloriidide liikumist betoonis sõltuvalt keskkonnaklassist ja betooni tootmiseks kasutatud sideainest, vastavalt esimese peatükis tutvustatud mudelile. Analüüsi tulemusel jõuti järeldusele, et erinevate tsementide puhul on kloriidide liikumine betoonis erineva kiirusega ja kloriidide seisukohalt on kõige kehvemad tsemendid CEM I, CEM II/A S ja CEM II/A LL ja neid tuleks vältida konstruktsioonides, mis on kuidagigi kloriididega kokkupuutes. Lisaks selgus, et kõige paremaid tulemusi kloriidide sissetungimise vastu betooni saavutati tsementide CEM III/B ja CEMII/A V kasutamise korral.

Kolmandas peatükis tutvustati kloriidide sissetungimise määramise välikatsete meetodikat ja läbiviimist, tutvustati uuritavaid rajatisi, teostati neljal sillal/viaduktil laborikatsetusteks vajaliku betoonipuru kogumine ning koostati uuritavate rajatiste kohta kloriidisisalduse eeldatavad profiilid ja analüüsiti saadud tulemusi. Töö käigus selgus, et neljast sillast kolmel on kasutatud betooni tootmisel tsementi CEM II/A T, mille puhul kirjanduses kloriide käitumise kohta info puudub. Eeldatavate kloriidiprofiilide mudeldamiseks kasutati seega CEM II/A-D ja CEM II/A-V andmeid, kuna nende kohta oli info olemas nii XD1 kui ka XD3 keskkonnaklassi puhul. Samuti esitavad need tsemendid migratsioonikoefitsiendi madalamat ja kõrgemat väärtust.

Mudelite analüüsist selgus, et kehvemal juhul on kriitiline kloriidisisaldus 0,6 %/c Tõrvandi viadukt 1 ja Lennu viadukti puhul juba 27 mm ning Saare silla puhul vastavalt 24 mm sügavusel. Arvestades, et need sillad/viaduktid on alla 10 aasta vanused ja kloriidide kriitiline tase on umbes poole peal projekteeritud kaitsekihist, siis võib eeldada, et kehvemal juhul hakkab armatuur roostetama ca 15. aastal ja Saare sillal lausa 10. aastal. Samas tuleb ära märkida, et kuna kasutatud tsemendi CEM II/A-T kohta ei olnud andmeid saada, siis on arvutustes saadud kõige kehvem tulemus

tsemendiga CEM II/A-V, mille kohta on varasemas peatükis leitud, et see ei sobi kloriididega kokkupuutuvasse keskkonnaklassi. Seega järeldati, et tõenäoliselt ei ole seis veel nii kriitiline ja täpne olukord selgub laborikatsetest.

Esiolgu oli plaanitud neljandas peatükis analüüsida uuritud sildade laboritulemusi, võrrelda tulemusi analüütilise mudeliga ja täpsustada prognoosmudelit ning arvutada välja uuritud rajatiste puhul eeldatav armatuurterase korrodeerumise aeg. Kahjuks läks teisiti. Keegi ei osanud ette näha, mis mõju avaldab Venemaa 24. veebruaril alustatud sõda Ukraina vastu. Kui 20. mai 2022 seisuga ei olnud labor veel katsetamiseks vajalikke abimaterjale Ameerika Ühendriikide tehast kätte saanud, võeti autori ja juhendaja arutelu käigus vastu otsus töö pealkirja täpsustada ja lisaks analüüsida viimases peatükis Umbsaare raudteeviadukti uuringute käigus kogutud kloriidide andmeid ja nende ühtimist prognoosimudelitega.

Umbsaare raudteeviadukti mudelite ja reaalse mõõtetulemuste võrdlemisel selgus, et mõõtetulemused ja prognoosimudel lähevad üldiselt hästi kokku. Peamised erinevused tulenevad keskkonnaklassi tõlgendamisest, sest sellest sõltuvad mudelites kasutatavad betooni pinna kloriidisisalduse ning vananemise eksponendi väärtused. Neist suuremat mõju avaldab just viimane, sest XD1 keskkonnaklassi puhul on see 0,65, aga XD3 keskkonnaklassis sõltub väärtus tsemendi tüübist. See võib põhjustada olukorra, kus osad mõõtepunktid jäävad nõ kahe klassi vahele, olles XD3 klassi miinimumist tugevalt allpool aga samas XD1 klassi maksimumist jällegi palju kõrgemal.

Kuna on teada, et Eesti tingimustes on kloriidid probleemiks ja rajatised ei pea projekteeritud 100 aastat ilma remondita vastu, antakse magistr töö lõpus autori poolset soovitus, millele pöörata betooni kloriidikindluse osas tähelepanu. Selleks tuleb hinnata betooni sobivust ja vastupanu kloriididele ning orienteeruvalt 10 aasta möödudes rajatise valmimisest, teostada kloriidide mõõtmised betoonis, et kindlaks teha, kuidas konstruktsioonid on vastavas keskkonnas käitunud ja näha kuidas kloriidid on juba betoonis liikunud. Samuti soovitatakse tulemustele hinnangu andmiseks kasutada FIB34 [2] ja FIB76 [3] toodud soovituslikku kriitilise kloriidisisalduse väärtust 0,6 %/c, mitte betooni tootmisel määratletud piirväärtuseid.

Lisaks antakse töö raames soovitus kogutud proovide laboritulemuste kasutamiseks alusmaterjalina tulevastes uuringutes CEM II/A-T migratsioonikoefitsiendi välja arvutamiseks ja A. Rahimi doktoritöös puhtalt tsemendi koostisest tuletatud vananemise eksponendi kontrollimiseks. Töö autori hinnangul võiks edaspidiste uuringute läbiviimisel leida veel rajatise, kus on betooni valmistamiseks kasutatud tsemendi CEM II/A-T, et neilt proove võtta, mis annab võimaluse täpsemateks arvutusteks.

Lõpetuseks annab töö autor omapoolsed soovituslikud juhised, kuidas proovide võtmist korrektselt teostada.

SUMMARY

The aim of the master's thesis was to study the intrusion of chlorides into concrete and the resistance of concrete to the intrusion of chlorides due to the environmental class. In addition, analyse the tests carried out on the bridge and, as a result, make recommendations for specifying predictive models, which would allow a more accurate assessment of the durability of bridges in the future.

The first chapter of the work introduced the environmental classes due to chlorides, the determination of the concrete protection layer and the limit values for concrete based on the environmental class and the recommendations of the standards. The chloride penetration depth prediction model and its elements according to the guidelines published by the International Federation of Structural Concrete (fib) were also introduced.

In the second chapter, the movement of chlorides in concrete was analyzed depending on the environmental class and the binder used for the production of concrete, according to the model presented in the first chapter. The analysis concluded that different cements have different rates of chloride movement in concrete and the worst cements in terms of chlorides are CEM I, CEM II/A S and CEM II/A LL, and should be avoided in structures that are in some way in contact with chlorides. In addition, it was found that the best results against the penetration of chlorides into the concrete were obtained when using CEM III/B and CEM II/A V cements.

The third chapter introduced the methodology and conduct of field tests for determining the intrusion of chlorides, introduced the facilities under study, the collection of concrete debris necessary for laboratory testing on four bridges/viaducts was carried out, and expected profiles of chloride concentrations were compiled for the facilities under investigation and the results obtained were analysed. In the course of the work, it turned out that in three of the four bridges, cement CEM II/A-T has been used in the production of concrete, for which there is no information about the behaviour of chlorides in the literature. The expected chloride profiles were therefore modelled using CEM II/A-D and CEM II/A-V data, as information on them was available for both the XD1 and XD3 environmental classes. These cements also represent lower and higher values of the migration coefficient.

The analysis of the models revealed that in the worst case the critical chloride content 0,6 %/c is in the case of Tõrvandi viaduct 1 and Lennu viaduct already at a depth of 27 mm and respectively in the case of Saare bridge at a depth of 24 mm. Considering that

these bridges / viaducts are less than 10 years old and the critical level of chlorides is about half of the designed protective layer, it can be assumed that in the worst case the reinforcement will start to rust in about 15 years and on the Saare bridge even in 10 years. However, it should be noted that as no data were available for the CEM II/A-T cement used, the worst result in the calculations is with CEM II/A-V cement, which was not considered suitable for the chloride-exposed environmental class in the previous chapter. Thus, it was concluded that the situation is unlikely to be so critical yet, and the exact situation will be revealed by laboratory tests.

In the fourth chapter, it was initially planned to analyze the laboratory results of the investigated bridges, compare the results with the analytical model and refine the predictive model, and calculate the expected corrosion time of the reinforcing steel for the investigated structures. Unfortunately, it went differently. No one could have predicted the impact of Russia's war against Ukraine, which began on February 24. If, as of May 20, 2022 the laboratory had not yet received the supporting materials for testing from the United States plant, a decision was taken during the discussion between the author and the supervisor to specify the title of the work and, in addition, to analyse in the last chapter the data of chlorides collected during the Umbsaare railway viaduct studies and their alignment with the predictive models.

When comparing the models of the Umbsaare railway viaduct and the actual measurement results, it turned out that the measurement results and the predictive model generally go well together. The main differences are due to the interpretation of the environmental class, since the values of the chloride content of the concrete surface used in the models and the values of the aging exponent depend on it. The latter has a greater impact, as it is 0,65 for environmental class XD1, but depends on the type of cement for environmental class XD3. This can lead to a situation where some of the measuring points are between the so-called two classes, being well below the XD3 class minimum, but at the same time much higher than the XD1 class maximum.

As it is known that chlorides are a problem in Estonian conditions and the facilities do not last 100 years without repairs, at the end of the master's thesis, recommendations from the author of the work will be given to pay attention to when it comes to the chloride resistance of concrete.

For this purpose, the suitability and resistance of the concrete to chlorides must be assessed and, approximately 10 years after the completion of the facility, chloride measurements must be carried out in the concrete to determine how the structures have behaved in the environment and how the chlorides have already moved in the concrete. It is also recommended to use the recommended critical chloride content of

0,6 %/c, as set out in FIB34 [2] and FIB76 [3], be used to assess the results, rather than the limit values defined in the production of concrete.

In addition, the work provides a recommendation to use the laboratory results of the collected samples as a base material for future studies to calculate the CEM II/A-T migration coefficient and to verify the aging exponent derived purely from the cement composition in A. Rahim's doctoral thesis. According to the author of the work, in the course of further research, more facilities should be found where CEM II/A-T cement was used for the production of concrete in order to take samples from them, which provides an opportunity for more precise calculations.

Finally, the author gives his own recommended instructions on how to carry out the sampling correctly.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Persidski, „Raudbetooni kloriidikindluse uurimine tugevusklassi ja betoonilisandi näitel“, [Magistritöö], Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2015.
- [2] Fédération internationale du béton, fib Bulletin No. 34: „Model Code for Service Life Design“, 2006.
- [3] Fédération internationale du béton, fib Bulletin No. 76: „Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides“ [State-of-the-art report], Germany, 2015.
- [4] MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Beton. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus“ EVS-EN 206:2014+A2:2021, 2021.
- [5] Concrete Reinforcing Steel Institute, „Reinforced Concrete“ Loetud aadressil: <https://www.crsi.org/index.cfm/basics/reinforced-concrete> Kasutatud: 05.02.2022.
- [6] Eesti Betooniühing, „Beton kui kestlik ehitusmaterjal“ Loetud aadressil: <https://www.beton.org/veel-betonist/beton-ja-keskkond/> Kasutatud: 05.02.2022.
- [7] A. Guettala ja A. Abibsi, „Corrosion degradation and repair of a concrete bridge“, Materials and Structures 39: pp. 471–478, 2006, doi: 10.1617/s11527-005-9046-z.
- [8] CHLORTEST, „Guideline for Practical Use of Methods for Testing the Resistance of Concrete to Chloride Ingress“, EU Funded Research Project under 5FP GROWTH Programme, Deliverable D23, PROJECT N°: GRD1-2002-71808, detsember 2005.
- [9] MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Eurokoodeks 2: Betoonkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonetele“ EVS-EN 1992-1-1:2005+A:2015+NA:2015, 2015.
- [10] Martti Kiisa „Betonkonstruktsioonide projekteerimise alused (2020-01)“ Abimaterjal Tallinna Tehnikakõrgkooli üliõpilastele, Loetud aadressil: https://moodle.ttk.ee/pluginfile.php/303919/mod_resource/content/3/Osa%203.%20Kestvus%20%5B2020-01%5D.pdf Kasutatud: 06.04.2022.
- [11] MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Tsement. Osa 1: Harilike tsementide koostis, spetsifikatsioonid ja vastavuskriteeriumid“ EVS-EN 197-1:2011, 2012.

- [12] DuraCrete - Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. Report NO.: BE 95-1347, pp. 62-63, 2000.
- [13] DARTS - Durable and Reliable Tunnel Structures: Data, European Commission, Growth 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.
- [14] J. Vanamõisa, „Raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse hindamine toimivuspõhiste mudelitega”, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2021.
- [15] Transpordiamet „Teetööde tehnilised kirjeldused (2019)” Loetud aadressil: <https://transpordiamet.ee/media/2669/download> Kasutatud: 17.02.2022.
- [16] K. Gode ja A. Paeglitis, „Concrete Bridge Deterioration Caused by De-Icing Salts in High Traffic Volume Road Environment in Latvia”, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, Volume 9(3) pp. 202–209, 2014, doi:10.3846/bjrbe.2014.25.
- [17] MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion”, EVS-EN 12390-11:2015, 2015.
- [18] MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Testing hardened concrete - Part 18: Determination of the chloride migration coefficient”, EVS-EN 12390-18:2021, 2021.
- [19] MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Eurokoodeks. Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused” EVS-EN 1990:2002+NA:2002, 2003.
- [20] MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of chloride content in hardened concrete” EVS-EN 14629:2007, 2007
- [21] T. Randoja ja A. Papp, „Põhimaantee nr 2 (E263) Kandiküla-Uhti lõigu km 182,6 – 194,2 ehitusala V km 188,512 – 191,057 tehniline projekt. RAJATISED: Maanteeviadukti PK 1897+02 (km 189,7) tehniline projekt”, Stricto Project OÜ, Projekti nr: S-13-26, Tallinn, 2013.
- [22] Transpordiameti Teeregister, Loetud aadressil: <https://www.mnt.ee/et/tee/teeregister> Kasutatud: 12.02.2022.
- [23] Transpordiameti arhiivimaterjalid, tee-ehitusobjektide täitedokumentatsioonid.

[24] K. Sooru, „Tartu Lääne Ümbersõidu 5. ala Ehitusprojekt. Tartu-Luhamaa mnt. km 188.512 – 191.057, Ülenurme vald, Tartu maakond. Lennujaama Viadukti Ehituskonstruksioonid, Tööprojekt“, OÜ Skeleton, Töö nr P-03-2014, Tallinn, 2015.

[25] A. Funk, „Kastolatsi ja Nõuni küla, Palupera ja Otepää vald, Valga maakond Riigitee nr 46 Tatra-Otepää-Sangaste KM 20,108 asuva KINTSLI SILLA (NR 974) Tööprojekti koostamine. Tööprojekt“, Stricto Project OÜ, Projekti nr: S1709-1, Tallinn 2017.

[26] M. Meisalu ja R. Oppar, „Riigimaantee nr. 22280 Hammaste-Rasina km 1,275 asuva Saare silla remondi Põhiprojekt“, OÜ Järelding Inseneribüroo, Töö nr P 291-2, Tallinn 2017.

[27] A. Rahimi „Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung“, [Doktoritöö], Technische Universität München, München, Saksamaa, 2016.

[28] S. Keßler ja C. Gehlen, „Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 149, Bergisch Gladbach, 2020.

[29] M. Kiisa ja K. Lellep „Umbaare raudteeviadukti (nr 883) raudbetoonkonstruktsioonide uuringud“, Tallinna Tehnikakõrgkool, Töö nr 4-14/57, 16.06.2015.

[30] Keskkonnaagentuuri Ilmateenistus, Loetud aadressil: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/> Kasutatud: 17.02.2022 ja 21.05.2022.

[31] Raudbetoon tüüptalade kataloog „Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Выпуск 56 – дополнения“, Moskva 1962.

LISAD

Lisa 1 Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama keskmine õhutemperatuur (°C) 2004-2021 [30]

Aasta	Kuud												Keskmine
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2004	-7,6	-4,2	0,1	6,1	10,6	13,8	16,9	17,5	12,2	6,1	-0,5	0,0	5,9
2005	-1,6	-7,6	-6,0	5,2	11,2	14,8	18,6	16,5	13,2	7,1	2,9	-3,9	5,9
2006	-6,3	-9,2	-4,2	5,9	11,3	16,7	19,0	17,1	14,0	8,3	2,6	3,2	6,6
2007	-1,7	-10,2	4,5	5,5	12,3	16,3	17,0	18,1	11,4	6,9	0,0	0,8	6,9
2008	-1,1	0,9	0,7	7,4	10,7	14,6	16,6	16,1	10,1	8,5	2,5	-0,8	7,2
2009	-3,1	-4,7	-1,0	6,2	11,8	14,2	17,3	15,8	13,1	4,3	2,6	-4,8	6,0
2010	-13,7	-7,5	-1,3	6,4	12,8	15,0	22,6	18,4	11,3	4,5	0,5	-8,0	5,2
2011	-4,3	-10,8	-1,2	6,8	11,7	17,7	20,5	16,6	12,8	7,4	3,7	1,6	7,0
2012	-5,2	-10,5	0,1	5,3	12,0	13,9	18,3	15,2	12,4	5,9	2,7	-6,5	5,4
2013	-7,1	-3,0	-7,0	4,0	15,0	18,2	17,9	17,2	11,3	7,2	4,1	1,7	6,7
2014	-8,0	0,0	2,7	6,9	12,3	13,7	19,6	16,8	12,4	5,6	1,5	-1,3	6,9
2015	-1,5	-0,8	3,0	5,8	10,7	14,6	16,1	17,0	12,8	4,8	3,7	2,4	7,4
2016	-9,1	0,5	-0,1	6,0	14,2	16,2	18,2	16,3	12,5	4,1	-0,8	-0,1	6,5
2017	-3,4	-2,9	1,5	3,4	10,2	13,8	15,7	16,5	12,1	5,2	2,6	0,4	6,3
2018	-2,1	-8,3	-3,5	7,2	15,2	15,5	20,3	18,4	13,9	7,2	2,4	-2,5	7,1
2019	-5,7	-0,1	1,2	7,4	11,1	18,3	15,9	16,3	11,6	7,0	2,7	1,9	7,3
2020	2,6	1,1	2,3	4,8	9,4	18,2	16,1	16,5	13,8	8,9	4,3	-0,5	8,1
2021	-4,1	-6,8	0,2	5,2	10,7	19,6	21,5	15,5	10,0	7,8	2,5	-6,2	6,4
Keskmine	-4,6	-4,6	-0,4	5,9	11,9	15,8	18,2	16,8	12,3	6,5	2,2	-1,3	6,6



Lisa 2. Transpordiameti kooskõlastus sildade puurimiseks

TRANSPORDIAMET

Germo Ilvesmets

Teie 03.03.2022

Meie 09.03.2022 nr 8-6/22/4732-2

Lõuna teehoiupiirkonnas sildade puurimise kooskõlastus.

Transpordiamet kooskõlastab Tallinna Tehnikaülikool lõputöö koostamise raames sildade puurimise kloriidide sisse tungimisest tingitud keskkonnaklassi ja betooni vastupanu hindamiseks.

Puurimised vastavalt tehnoloogilisele kirjeldusele on lubatud järgnevatel sildadel:

- TÕRVANDI viadukt 1
- LENNU viadukt
- KINTSLI sild
- SAARE sild

Tööde teostamisel:

- Ei tohi häirida liiklust ja tööd tuleb teostada väljaspool liikluskeskkonda. Liikluse häirimiselt tuleb esitada ajutine liikluskorraldus projekt ja kooskõlastada eraldi enne tööde teostamist.
- Minimaalselt 3 tööpäeva enne puurimisest tuleb teavitada Priit Veeroja, priit.veeroja@transpordiamet.ee ; +372 5400 5358, et Transpordiametil oleks võimalik kontrollida tööde teostamise kvaliteeti.
- Peale tööde teostamist 10 tööpäeva jooksul esitada transpordiametile pildid taastatud puuraukudest.

Lugupidamisega

(allkirjastatud digitaalselt)

Priit Veeroja

sillainsener

taristu ehitamise ja korrashoiu osakonna lõuna üksus

Lisa: Tehnoloogiline kirjeldus

Priit Veeroja

54005358, Priit.Veeroja@transpordiamet.ee

Lisa 3. Sildade puuraukude sügavused

KINTSLI sild

kuupäev 12.03.2022
algus 12:10 lõpp 14:22
päike, tuulevaikne, sademeid ei ole

Proovi nr	Servaprussi peal (mm)			Keskmine (mm)
1.1	9,8	9,7	10,0	9,83
1.2	19,9	20,4	20,2	20,17
1.3	29,9	30,1	30,0	30,00
1.4	39,5	40,3	40,2	40,00

Proovi nr	Servaprussi külg (mm)			Keskmine (mm)
2.1	10,0	9,8	9,9	9,90
2.2	19,8	20,6	20,3	20,23
2.3	30,3	30,5	29,9	30,23
2.4	40,4	40,4	39,6	40,13

Proovi nr	Servaprussi all (mm)			Keskmine (mm)
3.1	10,0	9,7	9,6	9,77
3.2	19,9	20,1	20,2	20,07
3.3	30,1	30,4	30,6	30,37
3.4	40,0	40,3	39,8	40,03

SAARE sild

kuupäev 12.03.2022
algus 16:30 lõpp 18:32
päike, tuulevaikne, sademeid ei ole

Proovi nr	Servaprussi peal (mm)				Keskmine (mm)
1.1	10,2	9,7	10,0	9,3	9,80
1.2	19,9	20,5	20,2	20,5	20,28
1.3	29,5	30,4	30,4	30,6	30,23
1.4	40,5	40,0	40,4	41,0	40,48

Proovi nr	Servaprussi külg (mm)				Keskmine (mm)
2.1	9,8	9,7	10,0	10,0	9,88
2.2	19,9	20,1	20,2	20,6	20,20
2.3	29,8	29,8	29,9	31,0	30,13
2.4	39,9	40,3	40,0	40,5	40,18

Proovi nr	Servaprussi all (mm)				Keskmine (mm)
3.1	10,0	9,7	10,0	9,9	9,90
3.2	19,8	19,8	20,1	19,8	19,88
3.3	29,9	30,2	30,0	29,7	29,95
3.4	39,5	40,5	40,2	39,5	39,93

TÖRVANDI viadukt 1

kuupäev 13.03.2022
 algus 11:50 lõpp 13:51
 päike, tuul, sademeid ei ole

Proovi nr	Servaprussi peal (mm)				Keskmine (mm)
1.1	10,2	10,3	10,2	10,3	10,25
1.2	20,4	19,8	21,0	20,3	20,38
1.3	29,5	29,6	30,3	30,5	29,98
1.4	40,3	40,4	40,1	41,0	40,45

Proovi nr	Servaprussi külj (mm)				Keskmine (mm)
2.1	10,00	9,50	10,40	9,80	9,93
2.2	19,50	20,00	20,00	19,70	19,80
2.3	29,50	29,80	30,00	30,10	29,85
2.4	40,80	40,50	40,40	40,00	40,43

Proovi nr	Servaprussi all (mm)				Keskmine (mm)
3.1	9,0	9,0	9,4	9,6	9,25
3.2	19,7	19,0	19,8	19,8	19,58
3.3	30,3	30,5	29,9	29,5	30,05
3.4	39,9	39,8	40,0	39,4	39,78

LENNU viadukt

kuupäev 12.03.2022
 algus 14:18 lõpp 15:56
 päike, tuul, sademeid ei ole

Proovi nr	Servaprussi peal (mm)				Keskmine (mm)
1.1	9,9	10,0	9,7	11,0	10,15
1.2	21,3	20,7	21,0	20,5	20,88
1.3	30,1	31,2	30,6	32,0	30,98
1.4	39,9	40,6	40,5	40,3	40,33

Proovi nr	Servaprussi külj (mm)				Keskmine (mm)
2.1	10,0	9,8	9,9	9,7	9,85
2.2	20,0	20,5	20,3	20,2	20,25
2.3	31,1	29,7	30,6	29,6	30,25
2.4	40,0	40,6	39,8	41,9	40,58

Proovi nr	Servaprussi all (mm)				Keskmine (mm)
3.1	10,3	10,0	9,3	9,4	9,75
3.2	19,5	19,3	19,8	20,0	19,65
3.3	29,5	29,5	30,6	29,0	29,65
3.4	40,4	40,8	39,6	40,2	40,25