



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**AASTATEL 2001-2019 PÜSTITATUD  
RAUDBETOONEHITISTE ESINEVATE  
KORROSIONINÄHTUSTE ANALÜÜS**

**ANALYSIS OF CORROSION PHENOMENA IN  
REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BUILT BETWEEN  
2001 AND 2019**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Evelin Lass

Üliõpilaskood: 192739EAEI

Juhendaja: Prof. Lembi-Merike Raado

Kaasjuhendaja: Lektor Tanel Tuisk

# 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.

6. mai 2024

Autor:

.....

*/ allkiri /*

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"....." ..... 20.....

Juhendaja:

.....

*/ allkiri /*

Kaitsmisele lubatud

".....": .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....

*/ nimi ja allkiri /*

# LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Evelin Lass,**

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

**Aastatel 2001-2019 püstitatud raudbetoonehitiste esinevate  
korrosiooninähtuste analüüs,**

mille juhendaja on Lembi-Merike Raado

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.

06.05.2024



# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **EVELIN LASS**Üliõpilaskood **192739**Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peeriala: Ehitusmajandus ja juhtimine

Lõputöö teema:

**AASTATEL 2001-2019 PÜSTITATUD RAUDBETOONEHITISTE ESINEVATE  
KORROSIONINÄHTUSTE ANALÜÜS**ANALYSIS OF CORROSION PHENOMENA IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BUILT  
BETWEEN 2001 AND 2019Juhendaja: **Lembi-Merike Raado**

lembi.raado@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja  
PerekonnanimiKontakt (e-post või  
telefon)

Allkiri ja kuupäev

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kaardistada ja selgitada raudbetoonehitiste korrosiooninähtuste põhjuseid.

Töö keel: eesti keel

## Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Kirjandusega tutvumine	08.03.2024
2. Objektide valik ja andmete kogumine	01.10.2023
3. Objektide hindamised ja vigade kaardistamine	05.04.2024
4. Lõputöö kirjutamine	06.05.2024
Kokkuvõtte eesti keeles	06.05.2024
Kokkuvõtte inglise keeles	06.05.2024

### Lõputööde ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

08.05.2024

Peale ülevaatus saab teha väiksemaid korrekture ja üles laadida töö Moodle keskkonda plagiaadikontrolliks ÜHE pdf failina.

**Palun vormistada lõputöö käesolevale mallile. Nõuetele mittevastavaid lõputöid kaitsmisele ei lubata.**

### Lõputöö esitamise tähtaeg:

20. mai 2024

Plagiaadikontrolli läbinud lõputöö digiallkirjastatakse autori, juhendaja(te), konsultandi(tide) ja kaitsmiskomisjoni esimehe poolt. Paberil pole vaja allkirju koguda.

Lõputöö ülesanne välja antud: 09.02.2023

Juhendaja: **Lembi-Merike Raado**

Ülesande vastu võtnud: **Evelin Lass**

Avalikustamise piirangu tingimused: puuduvad

# SISUKORD

TABELITE LOETELU .....	9
JOONISTE LOETELU.....	10
SISSEJUHATUS .....	12
1. TÖÖ EESMÄRK JA PÜSTITATUD ÜLESANDED .....	14
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	15
2.1 Raudbetooni kasutuselevõtt.....	15
2.2 Kestvus ja eksploatatsiooniaeg.....	16
2.3 Konstruktsiooni ümbritsev keskkond ja vastavus keskkonnaklassile .....	17
2.4 Raudbetonelemendi või -konstruktsiooni kaitsekihi optimaalne paksus ning selle vastavus ümbritseva keskkonna või kasutustingimustega .....	23
2.5 Vee mõju betoonpindadele .....	26
2.6 Vee kogunemine pindadele .....	27
2.7 Sademete ja pritsmete mõju .....	29
2.8 Tuultest tingitud sademete intensiivsus.....	30
2.9 Kloriidide sissetung raudbetooni .....	32
2.10 Õhusaaste ladestumine betoonpinnale.....	34
2.11 UV-kiirgus ja temperatuuri muutused betoonpinnal .....	36
2.12 Biodegradatsioon raudbetoonil.....	39
2.12.1 Hallitus .....	41
2.12.2 Seened.....	41
2.12.3 Bakterid .....	43
2.13 Külmutamine ja sulamine .....	45
3. EHITISTE VISUAALNE UURING .....	49
3.1 Objektide valik .....	49
3.2 Visuaalse vaatluse läbiviimine .....	49
4. TULEMUSTE ANALÜÜS .....	51
4.1 Büroohoone Toompuiestee 33a .....	51
4.1.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond .....	51
4.1.2 Lagunemisilmingud konstruktsioonil.....	51
4.1.3 Kokkuvõtte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele.....	59
4.2 TTP Kontorihoone .....	60
4.2.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond .....	61

4.2.2	Konstruksiooni lagunemisilmingud .....	61
4.2.3	Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele .....	66
4.3	LukuEkspert Büroohoone .....	67
4.3.1	Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond .....	67
4.3.2	Konstruksiooni lagunemisilmingud .....	68
4.3.3	Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele .....	71
4.4	IT Kolledž .....	71
4.4.1	Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond .....	72
4.4.2	Konstruksiooni lagunemisilmingud .....	73
4.4.3	Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele .....	77
4.5	Eesti Kunstiakadeemia .....	78
4.5.1	Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond .....	79
4.5.2	Konstruksiooni lagunemisilmingud .....	79
4.5.3	Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele .....	83
4.6	Sisekaitseakadeemia .....	84
4.6.1	Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond .....	85
4.6.2	Konstruksiooni lagunemisilmingud .....	85
4.6.3	Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele .....	89
	KOKKUVÕTE JA SOOVITUSED .....	91
	JÄRELDUSED .....	96
	SUMMARY AND RECOMMENDATIONS .....	98
	CONCLUSIONS .....	102
	KASUTATUD KIRJANDUS .....	103



## TABELITE LOETELU

Tabel 2.1 Näited keskkonnamõjudest [7] .....	17
Tabel 2.2 Keskkonnaklassid X0, XC, XD, XS [8] .....	20
Tabel 2.3 Keskkonnaklassid XF, XA [8] .....	21
Tabel 2.4 Keskkonnaklassidele vastavad looduslikus pinnases ja pinnasevees esinevate keemiliste mõjurite piirväärtused [8] .....	22
Tabel 2.5 Keskkonnaklassid XM [9] .....	22
Tabel 2.6 Orienteeruvad minimaalsed tugevusklassid [12] .....	23
Tabel 2.7 Armatuurterase kestvusest tulenevad minimaalsed kaitsekihi $c_{\min,dur}$ väärtused vastavalt standardile <i>EN 10080</i> [12].....	24
Tabel 2.8 Konstruksiooniklassi vähendamist 1. klassi võrra lubav betooni tugevusklass [9], [12].	24
Tabel 2.9 Minimaalse kaitsekihi suurendamine kulumisohu korral [9], [12] .....	25
Tabel 2.10 Minimaalsed betooni kaitsekihi paksused vastavalt standardi <i>EVS-EN 206</i> poolt määratud kasutusklassidele [12].....	32
Tabel 2.11 Erineva tugevusklassiga CEM I portlandtsementbetooni eeldatav karboniseerumiskiirus mm/aastas [4] .....	35
Tabel 2.12 Tuule kiiruse mõju temperatuurile [4] .....	48

## JOONISTE LOETELU

Joonis 2.1 Ekspluatatsioonija ja kvaliteedi omavaheline seos [5] .....	16
Joonis 2.2 Näited hoonete erinevate tarindite keskkonnaklassidest [9] .....	18
Joonis 2.3 Kahjustus mittepiisava kaitsekihi tõttu Toompuiestee 33a parkimismaja välipinnal [autori foto] .....	25
Joonis 2.4 Vee mõju väsimusele [16] .....	27
Joonis 2.5 Sademete mõju tuule intensiivsusest [18] .....	30
Joonis 2.6 Tuulevoolu muster hoone ümber ja sademete trajektoor sõltuvalt tuulevoolust, voolumuster sisaldab tuulekeerist (A), nurgavooge (B), eraldumist hoone nurkadest (C), retsirkulatsiooni tsoone (D), nihke kihte (E) ja kaugemaid tsoone (F) [18] .....	31
Joonis 2.7 Jätevastaste soolade ladestumine betoonpinnale [autori foto] .....	34
Joonis 2.8 Biokahjustuse situatsioon [30] .....	40
Joonis 2.9 Seente poolt mõjutatud betooni korrosiooni skemaatiline illustratsioon [33] .....	42
Joonis 2.10 Kolmeastmeline betooni biokorrosiooni mudel [33] .....	44
Joonis 2.11 Kapillaarpooride suuruse ja külmumistemperatuuri vaheline seos [35] .....	47
Joonis 3.1 Bioloogilise saaste kogumine parkimismaja siseküljelt [autori foto] .....	50
Joonis 4.1 Toompuiestee 33a [37] .....	51
Joonis 4.2 Toompuiestee Büroohoone seisukord aastal 2012 [38] ja aastal 2024 [autori foto] .....	52
Joonis 4.3 Hoone kahjustused kogu fassaadipinna ulatuses .....	52
Joonis 4.4 Büroohoone lõunakülg aastal 2012 [38] ja aastal 2024 [autori foto] .....	53
Joonis 4.5 Soklipiirkonna sammaldumine põhjasuunas [autori foto] .....	54
Joonis 4.6 Soklipiirkonna soolakahjustused [autori foto] .....	54
Joonis 4.7 Pinnakahjustuste esinemine soklipiirkonnas mõjutatult soolade esinemisest .....	55
Joonis 4.8 Armatuuri korrosioon lääne ja idaküljel [autori foto] .....	56
Joonis 4.9 Veekahjustuste ja bioloogilise kasvu esinemine fassaadi piirkonnas .....	57
Joonis 4.10 Avauste ümbruste veekahjustused ja armatuuri roostetamine [autori foto] .....	57
Joonis 4.11 Tõmbiavade ümbruste veekahjustused lääne- ja lõunasuunal [autori foto] .....	58
Joonis 4.12 Katusejoone seisukord peailmakaarte suhtes [autori foto] .....	58
Joonis 4.13 TTP Kontorihoone Pirital [37] .....	61
Joonis 4.14 TTP Kontorihoone lõunakülg aastal 2005 ja 2024 [1], [autori foto] .....	62
Joonis 4.15 TTP Kontorihoone kahjustused kogu fassaadipinna ulatuses .....	62
Joonis 4.16 Veekahjustused soklipiirkonnas lääne- ja idaküljel [autori foto] .....	63
Joonis 4.17 Pragunemisilmingud lääne-, ida- ja lõunaküljel [autori foto] .....	63
Joonis 4.18 Pragunemine lõunaküljel fassaadi ülaosas [autori foto] .....	64
Joonis 4.19 Vee voolamine ja bioloogiline kasv [autori foto] .....	64
Joonis 4.20 Katuseserva pragunemine [autori foto] .....	65
Joonis 4.21 LukuEkspert Büroohoone [37] .....	67
Joonis 4.22 LukuEkspert Büroohoone põhjakülg aastal 2006 ja 2024 [1], [autori foto] .....	68
Joonis 4.23 LukuEkspert Büroohoone kahjustused kogu fassaadipinna ulatuses .....	68
Joonis 4.24 Soklijoone kahjustused peailmakaarte suhtes [autori foto] .....	69
Joonis 4.25 Bioloogilise kasvu ilmingud fassaadipiirkonnas [autori foto] .....	70
Joonis 4.26 Armatuuri kaitsekihi puudumine paneeli koorikukihil [autori foto] .....	70
Joonis 4.27 IT Kolledž Raja 4c [37] .....	72
Joonis 4.28 IT Kolledži lõunakülg aastal 2008 ja 2023 [1], [autori foto] .....	73
Joonis 4.29 IT Kolledži fassaadipinna kahjustused kogu hoone ulatuses .....	73
Joonis 4.30 Sammaldumine soklijoone piirkonnas [autori foto] .....	74

Joonis 4.31 Soklijoone veekahjustused põhja- ja idasuunas [autori foto].....	75
Joonis 4.32 Külmakahjustused fassaadipinna lääneküljel [autori foto].....	75
Joonis 4.33 Armatuuri korrosioon trepptorni lõuna- ja põhjaküljel [autori foto].....	75
Joonis 4.34 Armatuuri korrosiooninähtused ida-, põhja- ja lõunafassaadil [autori foto].....	76
Joonis 4.35 IT Kolledži idakülg [37], [autori foto].....	76
Joonis 4.36 Rohevetikas Trentepohlia perekonnast [39].....	77
Joonis 4.37 Trentepohlia niitjad rakud, skaneeriva elektronmikroskoobi SEM PHENOM XL mikrofoto [39] .....	77
Joonis 4.38 Eesti Kunstiakadeemia [37] .....	79
Joonis 4.39 Eesti Kunstiakadeemia sisehoovi fassaadipind aastal 2018 ja 2024 [1], [autori foto] ..	80
Joonis 4.40 Vetikate koloniseerimine soklijoone piirkonnas [autori foto] .....	80
Joonis 4.41 Armatuuri roostetamine välistrepil [autori foto] .....	81
Joonis 4.42 Bioloogiline kasv konstruktsiooni taladel [autori foto] .....	82
Joonis 4.43 Kärjeline betoonipind avauste ümber [autori foto] .....	82
Joonis 4.44 Katusejoone bioloogilise kasvu ja õhusaaste ilmingud [autori foto] .....	83
Joonis 4.45 Sisekaitseakadeemia Pirital [37].....	85
Joonis 4.46 Sisekaitseakadeemia lõunakülg aastal 2019 ja 2024 [1], [autori foto] .....	86
Joonis 4.47 Sisekaitseakadeemia fassaadipinna kahjustused kogu hoone ulatuses .....	86
Joonis 4.48 Bioloogiline kasv põhjaküljel [autori foto] .....	87
Joonis 4.49 Murenemispraod lõunaküljel [autori foto] .....	87
Joonis 4.50 Vee voolamine mööda pinda [autori foto].....	88
Joonis 4.51 Betooni delaminatsioon ja armatuuri korrosioon lõunaküljel [autori foto] .....	88

## SISSEJUHATUS

Raudbetoonkonstruktsioonid, mis on tuntud ennekõike oma tugevuse ja vastupidavuse poolest, puutuvad väliskeskkonna ja võimalike ehitusvigade tagajärjel kokku mitmesuguste kahjustuste ja agressoritega, mis omakorda avaldavad negatiivset mõju betooni pinnale ning betooni struktuuri elueale. Betooni pindade lagunemine võib saada alguse nii looduslikest kui ka inimtekkelistest teguritest, mis ulatuvad ilmastikutingimustest kuni ehitusprotsessi käigus või selle eel tehtud vigadeni. Äärmuslikud ilmastikuolud, keemiliste ühendite ja saasteainete leidumine atmosfääris, vale betoonisegu koostise valik ja mitmed muud tegurid suurendavad kõik betooni struktuuri tundlikkust ning vähendavad vastupanuvõimet. On oluline mõista ja eristada, millised on need tegurid, mis viivad betooni kui materjali lagunemiseni, millised on selle lagunemisprotsessid ning millest on tingitud lagunemisprotsessi kiirus erinevates tingimustes.

Eesti Betooniühing ja Eesti Ehitusmaterjalide Tootjate Liit on alates 2000. aastast välja andnud erilistele betoonehitistele „Aasta Betoonehitis“ tiitli, mis sisaldab vajadusel žürii eriauhinda. Peamine konkursi eesmärk on analüüsida ja esile tuua ehitisi (hõlmavad nii hooneid kui ka rajatisi), mis osutavad tähelepanu betooni kui struktuurmaterjali eelistele, kombineerides betooni nägusust efektiivse ja ökonoomse teostusega. [1]

Käesoleva integreeritud inseneriõppe uurimusliku lõputöö teemaks on visuaalselt analüüsida „Aasta Betoonehitis“ tiitliga tunnustatud hoonetel tekkinud välisilme kahjustusi raudbetoonpinnal ning nende võimalikke põhjuseid. Antud uurimustöös on vaatluse alla võetud 6 Tallinnas asuvat raudbetoonist hoonet:

- Büroohoone Toompuiestee 33a, ehitusaasta 2001, eriauhind;
- TTP kontorihoone, ehitusaasta 2005, peaauhind;
- LukuExpert büroohoone, ehitusaasta 2006, peaauhind;
- IT Kolledž, ehitusaasta 2008, eriauhind;
- Eesti Kunstiakadeemia, ehitusaasta 2018, eriauhind;
- Sisekaitseakadeemia, ehitusaasta 2019, peaauhind.

Valimi koostamisel lähtuti ennekõike hoonete asukohast (Tallinn), ehitise tüübist ning ehitusaastate vahemikust, milleks antud hoonete puhul on vahemik 2001...2019.

Uurimustöö jaguneb põhimahult viite osasse. Esimeses osas tutvustatakse lõputöö eesmärki ja püstitatud ülesandeid.

Magistritöö teises osas antakse kirjanduslik ülevaade raudbetooni kui ehitusmaterjali kasutuselevõtust. Tuuakse välja kestvuse ja eksploatatsiooniaja erinevus ning neid mõjutavad omaduste seosed. Kirjeldatakse betoonkonstruktsioonide lagunemise põhjuste tegureid, antakse ülevaade lagunemise protsessidest ning nende põhjustest, põhinedes seejuures mitmetele teadusartiklitele.

Kolmas osa hõlmab visuaalse uuringu läbiviimise kirjeldust. Antakse ülevaade uuringu läbiviimiseks koostatud hindamistabelist ning kirjeldatakse hoonetel esinevate kahjustuste vaatluse läbiviimist.

Neljandas osas kirjeldatakse „Aasta Betoonehitis“ tiitliga pärjatud väljavalitud hooneid ning tuuakse välja põhilised betoonpinnal esinevad kahjustused iga hoone kohta eraldi. Antakse ülevaade hoonete kahjustuste põhjustest, tuginedes eelnevas peatükis mainitule.

Lõputöö viimane osa hõlmab endast uurimistöö käigus kogutud tulemuste analüüsi ning lõppjärel dust, pidades silmas esimeses osas kirjeldatud lõputöö eesmärki.

**Võtmesõnad:** raudbetoon, keskkonnatingimused, kahjustused, magistritöö

# 1. TÖÖ EESMÄRK JA PÜSTITATUD ÜLESANDED

Raudbetoon on oma olemuselt, pidades silmas just suurt koormuste vastupanu, ajas aina populaarsust kogunud. Kuigi eelmistel sajanditel nähti raudbetooni pigem tugeva ja vastupidava ehitusmaterjalina, mille välisilmele ja arhitektuurile rõhku ei pandud, on tänapäeva ühiskonnas betoonehitiste mainet kahjustanud nende hall, tihti ka määrdunud või pragunenud pind. Tuleb tõdeda, et üllataval kombel vananevad ning muudavad oma välisilmet just sel sajandil püstitatud betoonehitised kiiremini, kui seda oli mõeldud sajanditel [2].

Eelnevalt mainitu kutsub esile olulised küsimused. Kuidas saavutada konstruktsiooni esteetiline kestvus ka mitmekümne aasta möödudes? Mida tuleb silmas pidada ning millistele ümbritsevatele teguritele tähelepanu pöörata? Millised on nende tegurite tekkepõhjused ning mida vältida, et põhjused ei süveneks? Terviklik lähenemisviis, mis arvestab nii konstruktsiooni iseärasustega, kõige ümbritseva kui ka betooni kui ehitusmaterjali omadustega, on konstruktsioonide funktsionaalsuses ja kestvas säilivuses võtmetähendusega.

Käesolev magistritöö hõlmab endast auhinnaga pärjatud ühiskondlike raudbetoon hoonete välisilme kahjustuste kirjeldust ning nende tagamaade tutvustamist. Annab ülevaate aastate möödudes tekkinud kahjustuste ulatustest ning lagunemisprotsesse kiirendavatest teguritest.

Uuringu eesmärgipõhiseks täitmiseks on püstitatud järgmised ülesanded:

- kirjeldada, milline on raudbetoonkonstruktsioonide välispinna olukord aastate möödudes;
- anda ülevaade, millised on enimlevinumad raudbetoonkonstruktsioonide lagunemise ilmingud „Aasta Betoonehitis“ tiitliga tunnustatud hoonetel;
- mõista, milliste tingimuste esinemise korral saavad lagunemisprotsessid toimuda;
- välja selgitada, millised tegurid suurendavad raudbetooni lagunemisprotsesse ja nende kiirust.

## 2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

### 2.1 Raudbetooni kasutuselevõtt

Raudbetooni ajalugu küündib 19. sajandi lõppu, kus prantsuse insener Joseph Monier hakkas parema tugevuse ja vastupidavuse saavutamiseks kombineerima omavahel rauda ja betooni. Monier`i loodud versioon komposiitmaterjalist pani aluse selle uuendusliku materjali tutvustamisele, kuid ei kogunud tollel ajal veel nii suurt tunnustust. Järgnevatel aastakümnetel tegi saksa insener Fritz von Emperger mitmesuguseid täiendusi ja uurimustöid ning arendati välja patenteeritud meetodid raudbetoonkonstruktsioonide ehitamiseks. F. Emperger mõistis, et tugevus sõltub olulisel määral armeeringu asetusest ja kujust, ühtlane armatuuri jaotus ristlõikes tagas parema nakke betooni ja terase vahel ning parandas konstruktsiooni kui tervikut. Töötati välja erinevaid betoonisegusid, mille abil oli võimalik veelgi enam suurendada betooni tugevust ja vastupanuvõimet. Selleks täiustati tsemendi valmistamise protsessi ning katsetati erinevate lisandite mõjusid. Vastupanu armatuuri korrosioonile täiustati ka täiendavate kaitsekihtide tekitamisega. Teadaolevalt eksperimenteeriti erinevate katete ja segude kasutamise mõju, et vähendada terasarmatuuri korrosiooniohtu ebasoodsates keskkonnatingimustes. Põhilisteks praktilisteks kasutusalaadeks ehituses kujunesid esialgu sillad ja veetornid. 20. sajandi jooksul kogus raudbetoon märkimisväärset populaarsust ning selle materjali kasutusala laines ka elu- ja ärihoonetele, teede ja paljude teiste rajatiste ehitamisele. [3]

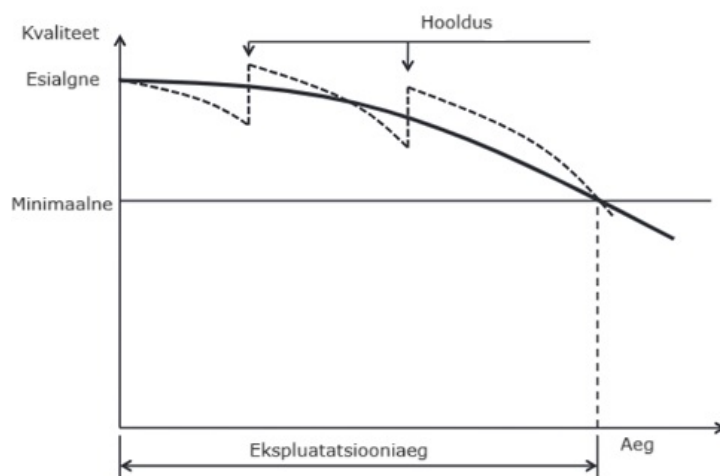
Varasemalt loodi ühiskonnas illusioon, et uuenduslik ehitusmaterjal on igavene ning võib isegi sajandite möödudes olla märkimisväärsete kahjustusteta. Selle mõttelaadi peamiseks ajendiks oli teadmine, et betoon on väga hea vastupidavusega terase korrosioonile. Aluseline keskkond, mis tulenes betooni valmistamiseks kasutatavast tsemendikivist, oli tuntud oma võime poolest pidurdada korrosiooniprotsessi. Märkimisväärset tähelepanu ja kindlustunnet andis ka raudbetooni suur tugevus ja vastupanuvõime. Raudbetoon võimaldas ehitada keerukaid ja suuremahulisi konstruktsioone, mis võtsid hästi vastu koormuseid ja survet. [3]

Raudbetoon, mis oli ja on siiani üks vastupidavaim ehitusmaterjal, on aja jooksul näidanud, et ei ole siiski täiesti igavene ehitusmaterjal nagu esialgu usuti. Raudbetoonkonstruktsioonide välisilme kahjustused, mis on suuremas osas seotud korrosiooni ja betooni pragunemisega, on toonud vajaduse täiustatud konstruktsiooniliste lahenduste ja pidevate hooldustööde järele, et kindlustada konstruktsiooni pikaealisus.

## 2.2 Kestvus ja ekspluatatsiooniaeg

Vastupidavus ja stabiilsus materjalide puhul erinevates keskkonnatingimustes kohanemiseks, on suurel määral sõltuvuses antud materjali kestvusest (püsivusest) ning ehitise, selle osa või materjali ekspluatatsiooniajast. On oluline mõista nende kahe mõiste vahelist erinevust. Materjali kestvus teisisõnu püsivus, inglise keeles *life-time*, viitab materjali võimele säilitada oma omadused ja struktuur aja jooksul, pidades vastu mitmesugustele keskkonnamõjudele ja koormustele, jäädes sealjuures lagunemata. Materjali näitajad võivad mitte vastata esitatavatele nõuetele, kuid materjal ise ei ole füüsiliselt lagunenu. [4]

Ekspluatatsiooniaja, inglise keeles *service life*, all mõistetakse perioodi, mille jooksul ehitis, selle osa või materjal suudab säilitada vajalikud tehnilised omadused ning täita neile etteantuid funktsioone, olles kokkupuutes väliskeskkonna ja kasutustingimustega. Võib öelda ka, et püsivus on võime vastu pidada lagunemisele, tagades soovitud ekspluatatsiooniaja saavutamise. Ehitatud konstruktsiooni valmimise järgselt on nii ehitise kui ka selle materjalide kvaliteedinäitajad tihtipeale palju kõrgemad, kui seda on minimaalselt nõutud. Aja möödudes hakkavad konstruktsioonis kasutatud materjalide kvaliteet halvenema, mis on peamiselt tingitud kas materjalide vananemisest või ümbritsevatest tingimustest. Belgia Genti Ülikooli professor Geert De Schutter on oma teadusraamatus *Damage to Concrete Structure* graafiliselt välja toonud seosed kvaliteedi ja ekspluatatsiooniaja osas (Joonis 2.1). [5]



Joonis 2.1 Ekspluatatsiooniaja ja kvaliteedi omavaheline seos [5]

Normaalsetes tingimustes jõuab kvaliteedi langus minimaalset nõutud tasemeni sihiks olnud ekspluatatsiooniaja lõpus. Agressiivsete keskkonnatingimuste esinemise korral



võib ehitise, selle osa või materjali kvaliteedi kaotus toimuda kiirelt ning seejuures olla ka märkimisväärselt suur. Selline olukord võib omakorda viia minimaalselt nõutud taseme ületamiseni, mille tulemusena tihtipeale jääb saavutamata konstruktsioonile ettenähtud eksploatatsiooniaeg. Antud olukorras võivad eksploatatsiooniaja saavutamiseks vajalikud olla hooldus- ja parandustööd. Parandustööde mõju avaldub järsu kvaliteedi suurenemisenä ja eksploatatsiooniaja pikenemisenä. Sellisel juhul tuleb eristada, kas tegemist on nii-öelda korrigeeriva parandustööga, mis on suunatud konstruktsiooni taastamisele kiirenenud lagunemise järel või on tegemist ennetava parandustööga, mis vähendab lagunemise riski tulevikku silmas pidades. [5]

## 2.3 Konstruktsiooni ümbritsev keskkond ja vastavus keskkonnaklassile

Raudbetooni vastupidavust väliskeskkonnas mõjutavad enim keemilised ja füüsilised keskkonnamõjurid. Seetõttu on oluline arvestada hoolikalt ümbritseva keskkonnaga, kuhu konstruktsioon rajatakse, kuna konstruktsiooni materjal peab säilitama oma kasutuskõlblikkuse ettenähtud kasutusea jooksul [9].

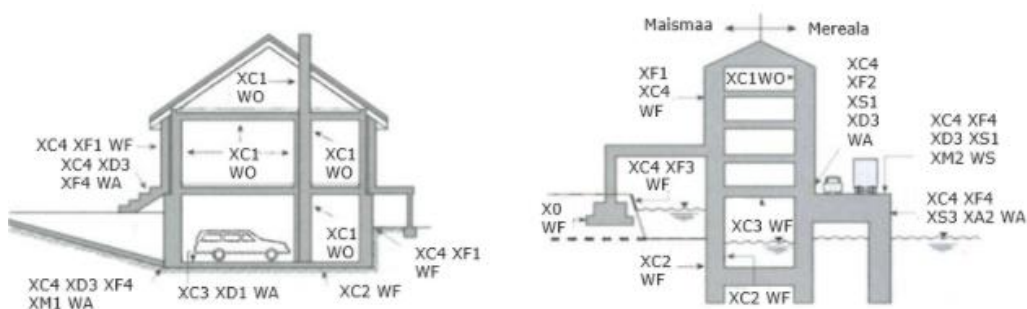
Konstruktsiooni ümbritsev väliskeskkond on väga mitmekülgne, pakkudes konstruktsiooni ja selle osadele mitmeid agressoreid, millega toime tulla ning seejuures säilitada ka visuaalne väljanägemine. Negatiivset mõju konstruktsiooni erinevatele osadele võivad avaldada nii vihm, õhuniisku, temperatuur, lumi, saasteained, ultraviolettkiirgus, hapnik kui ka mitmed muud tegurid, mis konstruktsiooni ümbritsevad (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Näited keskkonnamõjudest [7]

Asukoht	Mõju
Väliskeskkond - atmosfäär	Vihm, lumi või jää; õhu koostisosad; õhu saasteained; tuul; temperatuur ja niiskus; päike
Väliskeskkond – maapind või vesi	Vesi; pinnase koostisosad; pinnaselekke; teesoolad
Sisekeskkond	Temperatuur ja niiskus; saastavad ained (soolavesi autodelt); vesi (basseinid, lekke) ja kanalisatsioon; ladustatavad kemikaalid; kulumist põhjustavad tegevused

Tabel 2.1 toob esile mitmed näitajad keskkonnamõjudest, mis konstruktsiooni osasid ümbritsevad. Nende esinemise võimalikkusest võib sageli saada alguse betoonis oleva armatuuri korrosiooniprotsessid, kui terasarmatuur puutub kokku agressiivsete keemiliste ühenditega, mis imenduvad läbi betoonikihi teraseni. Temperatuurimuutuste ja vee koosmõju kahjustub betooni struktuuri külmumise ja sulamise tsüklite tagajärjel.

Betoonkonstruktsioonide vastupidavuse tagamiseks ja keskkonnamõjude vähendamiseks on välja töötatud keskkonnaklassid, mis võtavad arvesse erinevate keskkonnategurite mõjusid betooni pinnal. Standard *EVS-EN 206* määratleb ära sobivad betooni keskkonnaklassid erinevates ümbritsevates tingimustes (Tabel 2.1). Keskkonnaklassi valik võib olla kohandatud vastavalt konkreetsele kasutuskohale, võttes arvesse erinevaid tingimusi ja kaitsemeetmeid. Mitmed tegurid võivad mõjutada betooni samal ajal, sellisel juhul kasutatakse betooni keskkonnaklasside kombinatsiooni [8].



Joonis 2.2 Näited hoonete erinevate tarindite keskkonnaklassidest [9]

Keskkonnaklass X0: kasutatakse juhul, kui betoon ei sisalda sarrust või tarirauda, välja arvatud juhul, kui esineb külmumine-sulamine, kulumine või kokkupuude keemiliste mõjuritega. On lubatud kasutada armatuuri vaid siis, kui on tegemist väga kuiva keskkonnaga, kus on tagatud korrosiooniohu puudumine. [8]

Keskkonnaklass XC: kasutatakse olukorras, kus sarrust või tarirauda sisaldav betoon puutub kokku õhu või niiskusega ning on oht betooni karboniseerumisest tingitud korrosiooni tekkele. Klassinumbrid XC1...XC4 eristavad erinevaid niiskus- ja õhutingimusi. [8]

On oluline märkida, et niiskustingimus seondub armatuuri kaitsekihi seisundiga, siiski paljudel juhtudel võib pidada tingimusi kaitsekihis ja ümbritsevas keskkonnas samadeks. Nendel juhtudel võib kasutada ümbritseva keskkonna liigutust, kuid kui

betoon ja keskkond on teineteisest mingi tõkestava kihiga eraldatud, muutub olukord. [4]

Keskkonnaklass XD: kasutatakse, kui sarrust või tarirauda sisaldav betoon on kokkupuutes kloriididega, sealhulgas jäitevastaseid sooli sisaldava veega, mis ei ole merevesi. Madalamat klassi XD1 kasutatakse näiteks parkimismajade puhul, kus talveperioodil kasutatakse kloriidipõhiseid lumetõrjevahendeid, kuid betoonkonstruktsioonidele ei satu otseselt suures koguses kloriide. Kõrgemat klassi XD3 rakendatakse näiteks sillakonstruktsioonidele, mis on otseses kokkupuutes kloriide sisaldavate pritsemetega. [8]

Keskkonnaklass XS: kasutatakse, kui sarrust või tarirauda sisaldav betoon puutub kokku mereveega või sooli sisaldava mereveega. Klass XS1 kehtib konstruktsioonidele, mis ei ole otse mereveega kokkupuutes, näiteks rannikualade kergematele struktuuridele või mere ääres asuvatele rajatistele, mis jäävad kõrgemale veepiirist. Klass XS3 rakendub aga konstruktsioonidele, mis on otse mereveega kokkupuutes, näiteks merekaldal asuvatele rajatistele või mereehitistele, mis on regulaarselt mereveega kontaktis. [8]

Tabel 2.2 Keskkonnaklassid X0, XC, XD, XS [8]

Klassi tähis	Keskkonna kirjeldus	Näited keskkonnaklasside rakendamise kohta
1 Korrosiooni- või muu oht puudub		
X0	Kui betoon ei sisalda sarrust ega tariraudu: kõik tingimused, välja arvatud need, mille puhul esineb külmumine/sulamine, kulumine või keemilised mõjurid. Kui betoon sisaldab sarrust või tariraudu: väga kuiv	Betoon väga kuiva õhuga siseruumides
2 Karboniseerumisest põhjustatud korrosioon		
Kui sarrust või tariraudu sisaldav betoon puutub kokku õhu ja niiskusega, siis liigitatakse keskkonnatingimusi järgnevalt:		
XC1	Kuiv või püsivalt märg	Betoon madala õhuniiskusega siseruumides. Pidevalt vee all olev betoon
XC2	Märg, harva kuiv	Kaua veega kontaktis olevad betoonpinnad. Paljud vundamendid
XC3	Mõõduvalt niiske	Betoon mõõduka või kõrge õhuniiskusega siseruumides. Välisõhus olev vihma eest kaitstud betoon
XC4	Vaheldumisi märg ja kuiv	Veega kokkupuutuvad pinnad, mis ei kuulu klassi XC2
3 Kloriididest (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	Konstruksiooni osad, millele langevad kloriide sisaldavad piisad. Sillutised, autoparkla paneelid
4 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

Keskkonnaklass XF: kasutatakse, kui sarrust või tarirauda sisaldav märg betoon on avatud intensiivsetele külmumis- ja sulamistsüklitele. Keskkonnaklass jaguneb XF1...XF4, olenevalt vee küllastusastmest ning jäitevastaste ainete olemasolust. [8]

Keskkonnaklass XA: kasutatakse, kui betoonile toimuvad looduslikus pinnases ja pinnasevees esinevad keemilised mõjurid, millele viitab Tabel 2.4. [8]

Tabel 2.3 Keskkonnaklassid XF, XA [8]

Klassi tähis	Keskkonna kirjeldus	Näited keskkonnaklasside rakendamise kohta
5 Külumise/sulamise mõju koos või ilma jätevastaste ainetega		
Kui märjale betoonile mõjub nimetamisväärsel arvul külmumis/sulamistsükleid, on keskkonnaklassid järgmised:		
XF1	Mõõdukalt veega küllastunud, ilma jätevastaste ainetega	Vihma ja külma eest kaitsmata püstsed betoonpinnad
XF2	Mõõdukalt veega küllastunud, jätevastaste ainega	Teekonstruktsioonide püstsed betoonpinnad, mis on külmumise ja jätevastast ainet sisaldavate udupiiskade eest kaitsmata
XF3	Tugevasti veega küllastunud, ilma jätevastaste ainetega	Vihma ja külma eest kaitsmata rõhtsad betoonpinnad
XF4	Tugevasti veega küllastunud, jätevastase ainega või mereveega	Jätevastaste ainete mõjule avatud tee- ja sillakatted. Betonpinnad, mis on avatud jätevastaseid aineid sisaldavatele pritsmetele ja külma mõjule. Pritsmete tsoonis asuvad külma mõjule avatud mererajatised

Eelpool mainitud tabelitele lisaks tuleb arvesse võtta spetsiifilisi agressiivseid või kaudseid mõjureid, milleks on näiteks temperatuuri muutused, abrasiioon või vee penetratsioon. [10]

On oluline märkida, et klassifikatsioon kehtib looduslikule pinnasele ja pinnaveele, kus vee ja pinnase temperatuur jääb vahemikku 5 °C kuni 25 °C ja vee voolukiirus on nii väike, et tingimusi võib lugeda peaaegu staatilisteks (Tabel 2.4). Igale keemilisele mõjurile määratakse klass vastavalt selle kõige ebasoodsamale väärtusele. Kui kaks või enam agressiivset omadust viivad sama klassini, siis tuleb keskkond liigitada järgmisse kõrgemasse klassi, välja arvatud juhul, kui konkreetne uurimus kinnitab, et see pole vajalik. [8]

Tabel 2.4 Keskkonnaklassidele vastavad looduslikus pinnases ja pinnasevees esinevate keemiliste mõjurite piirväärtused [8]

Keemiline karakteristik	Etalon-katsemeetod	XA1	XA2	XA3
Pinnavesi				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	EN 196-2	≥200 ja ≤600	>600 ja ≤3000	>3000 ja ≤6000
pH	ISO 4316	≤6,5 ja ≥5,5	<5,5 ja ≥4,5	<4,5 ja ≥4,0
CO <sub>2</sub> mg/l agressiivne	EN 13577	≥15 ja ≤40	>40 ja ≤100	>100 kuni küllastumiseni
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	ISO 7150-1	≥15 ja ≤30	>30 ja ≤60	>60 ja ≤100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	EN ISO 7980	≥300 ja ≤1000	>1000 ja ≤3000	>3000 kuni küllastumiseni
Pinnas				
üldine SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/kg <sup>a</sup>	EN 196-2 <sup>b</sup>	≥2000 ja ≤3000 <sup>c</sup>	>3000 <sup>c</sup> ja ≤12000	>12000 ja ≤24000
Baumann Gully happelisus mg/l	prEN 16502	>200	Praktikas ei esine	
<sup>a</sup> Savipinnase, mille filtratsioonimoodul on alla 10-5 m/s, võib paigutada madalamasse klassi. <sup>b</sup> Katsemeetod näeb ette SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ekstraheerimist soolhappe abil; võib kasutada ka vee ekstraheerimist, kui betooni kasutuskohas on vastav kogus olemas. <sup>c</sup> Piirväärtus 300 mg/l vähendatakse 2000-le mg/kg, kui esineb sulfaatioonide betooni sissetungimise oht perioodilise kuivamise ja määrgumise või kapillaarimavuse tõttu.				

Euroopa ja Saksamaa standardites on lisaks eelpool mainitud klassidele käsitletud ka mehaanilisi korrosiooniprotsesse eraldi klassina. See sisaldab endast tingimusi erineva kulutamiskoormuse järgi. Nii iseloomustabki keskkonnaklass XM1...XM3 kulutamise intensiivsust betooni pindadel (Tabel 2.5). Kui kulumisoht puudub, siis klassi XM ei määrata. [9], [11]

Tabel 2.5 Keskkonnaklassid XM [9]

Klassi tähis	Keskkonna kirjeldus	Näited keskkonnaklasside rakendamise kohta
XM1	Mõõdukas kulumiskoormus	Kandvad tööstuspõrandad, mida koormavad õhkrehvidega transpordivahendid
XM2	Suur kulumiskoormus	Kandvad tööstuspõrandad, mida koormavad õhk- või täiskummrehvidega transpordivahendid
XM3	Väga suur kulumiskoormus	Kandvad tööstuspõrandad, mida koormavad metallratastega tõstukid Pinnad, millel liiguvad sageli roomiksõidukid Saastunud veega või settega vesiehitised

Standardis *EVS-EN 1992-1-1:2005+A1:2015+NA2015* lisas E on välja toodud orienteeruvad minimaalsed betooni tugevusklassid, mis hoiavad ära betooni kahjustumise ning tagavad armatuuri korrosioonikaitse (Tabel 2.6). Seetõttu tuleb kasutada kõrgemat betooni survetugevust, kui on vajalik konstruktsiooniarvutusel. [12]

Tabel 2.6 Orienteeruvad minimaalsed tugevusklassid [12]

Keskkonnaklass tabeli 2.2 järgi										
Korrosioon										
	Korrosioon karboniseerumisest				Korrosioon kloriididest			Korrosioon merevee kloriididest		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Orienteeruv minimaalne tugevusklass	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Betooni kahjustus										
	Oht puudub	Külmumise/sulamise toime				Keemilised mõjurid				
	Orienteeruv minimaalne tugevusklass	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37			C35/45	

## 2.4 Raudbetonelemendi või -konstruktsiooni kaitsekihi optimaalne paksus ning selle vastavus ümbritseva keskkonna või kasutustingimustega

Betooni kaitsekiht on üks olulisemaid parameetreid raudbetonelementidel ja konstruktsioonil, andes armatuurterasele küllaldase korrosioonikaitse väliskeskkonnas. Kaitsekihi eesmärk on luua barjäär, mis kaitseb betoonis sisalduvat armatuurterast väliskeskkonna agressorite eest, mille esinemise korral saab toimuda terase korrosiooniprotsess. Betoonkaitsekihi all mõistetakse täpsemalt kaugust betooni pinnale lähima armatuuri (kaasa arvatud põikiarmatuuri, rangid ja pinnaarmatuur) pinnast kuni betooni lähima pinnani [12].

Betoonkonstruktsioonide kaitsekihi (nimikaitsekihi) paksuse tagamiseks, tuleb arvestada minimaalse kaitsekihi ja kaitsekihi lubatava hälbe summaga. Ümbritseva keskkonna mõju arvestamisel vastavalt standardile *EVS-EN 1992-1-1:2005+A1:2015+NA2015* on tähtsaim kestvust puudutava kaitsekihi väärtus. Standardis on välja toodud minimaalsed kaitsekihi väärtused ( $c_{min,dur}$ ), mis on nõutud,

et tagada konstruktsiooni või selle osa kestvus, võttes arvesse keskkonnaklassi ja konstruktsiooniklassi S (Tabel 2.7). [12]

Tabel 2.7 Armatuurterase kestvusest tulenevad minimaalsed kaitsekihi  $c_{min,dur}$  väärtused vastavalt standardile EN 10080 [12]

Keskkonnanõuded kaitsekihile $c_{min,dur}$ (mm)							
Konstruktsiooniklass	Keskkonnaklass vastavalt tabelile 2.2						
	X0	XC	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Konstruktsiooniklassi (S) leidmiseks eurokoodeks detailseid juhiseid ei sätesta. Seetõttu tuleks lähtuda järgnevatest põhimõtetest:

- kui konstruktsiooni planeeritud kasutusiga on 50 aastat ja betooni tugevusklass vastab soovitatavale minimaalsele tugevusklassile, siis võib konstruktsiooniklassi S4 määramisel lähtuda minimaalsest kaitsekihist;
- kui konstruktsiooni planeeritud kasutusiga on 100 aastat, tuleks konstruktsiooniklassi suurendada 2. klassi võrra;
- plaatelementide puhul, kus ehitusprotsess ei mõjuta sarruse paigutust, võib konstruktsiooniklassi vähendada 1. klassi võrra;
- konstruktsiooniklassi võib vähendada 1. klassi võrra, kui tootmisel on kasutatud spetsiaalset kvaliteedikontrolli;
- kui tootmisel on kasutatud spetsiaalset kvaliteedikontrolli või alltoodud tabelis (Tabel 2.8) kirjeldatud tugevusklassi, võib konstruktsiooniklassi samuti vähendada 1. klassi võrra. [9]

Tabel 2.8 Konstruktsiooniklassi vähendamist 1. klassi võrra lubav betooni tugevusklass [9], [12]

X0/XC1	XC2/XC3	XC4/XD1/XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
≥C30/37	≥C35/45	≥C40/50	≥C45/55



Ekspluatatsiooni seisukohalt, mis puudutab betoonipinna kulumist (klassi XM), on lubatud minimaalset kaitsekihti ( $c_{min}$ ) suurendada kulumiskihi võrra vahemikus 5...15 mm, sellisel juhul on lubatud betoonipinna kulumine (Tabel 2.9). [9]

Tabel 2.9 Minimaalse kaitsekihi suurendamine kulumisohu korral [9], [12]

Abrasiooniklass	$c_{min}$ suurendamine (mm)
XM1	5
XM2	10
XM3	15

Raudbetoonkonstruktsiooni elementide projekteerimisel tuleb arvesse võtta vee penetratsiooni või selle võimalikku lekkimist koos sooli sisaldavate ainetega sõiduteelt konstruktsiooni. Seetõttu on standard *EVS-EN 1992-2:2005+NA:2008* sätestanud minimaalsed kaugused, mille korral tuleb arvestada, et konstruktsioon on otseselt mõjutatud jäitevastaste sooladega. Horisontaal- ja vertikaalsuunal tuleb arvestada nendeks väärtusteks 6 m. [10]

Tänavapildis on selgelt silma jäänud, kus betoonkaitsekiht konstruktsioonil, mis asetseb sõidutee vahetusläheduses, ei ole tagatud, seda nii vanemate kui ka uuemate hoonete puhul. Joonis 2.3 kujutab näidet vastavast konstruktsioonist.



Joonis 2.3 Kahjustus mittepiisava kaitsekihi tõttu Toompuiestee 33a parkimismaja välipinnal [autori foto]

Parkimismaja vertikaalse pinna kaugus lähedalasuvast sõiduteest on  $\sim 2,5$  m ning kõrgus armatuuri korrosiooniprotsessi toimumisest  $\sim 2$  m. Pildilt järeldub, et konstruktsiooni projekteerimisel ei ole arvestatud õige keskkonnaklassiga ning sellele

vastava betoonkaitsekihiga, mis annab sooladele ja muudele agressoritele ideaalse võimaluse betoonpinda nõrgestada ning terasarmatuuril korrosiooniprotsessi alustada.

## 2.5 Vee mõju betoonpindadele

Vesi on teadatuntud kui üks väliskeskkonna agressori põhiline näitaja, mille esinemisel saavad alguse betoonpindade mitmed lagunemisprotsessid. Ehitis võib veega kokku puutuda mitmel moel:

- konstruktsioon või materjal puutub otseselt pidevalt veega kokku, asetsedes vees, olles vee surve all;
- konstruktsioon või materjal on ajutiselt kokkupuutes veega, näiteks sademetega, pritsemetega, vee voolamisel mööda seinu;
- konstruktsioon või materjal on kokkupuutes rohu all oleva veega, näiteks tuulega vastu seinu peksev vihm, vesiehitused, mahutid;
- kondensatsioonivee tekkimine pindadel nende erinevate temperatuuride tõttu, näiteks soe õhk kondenseerub jahedatel pindadel. [4]

Betoonkonstruktsioonid on praktiliselt nii mehaaniliste, keemiliste kui ka füüsikaliste mõjude tõttu paratamatult vastuvõtlikud pragunemisele või mikropragunemisele, luues seeläbi transpordikanalid vee ja selles lahustunud ainete liikumiseks materjalis. [13]

Poorid, nende suurus ja jaotus, on suure tähtsusega materjali veesisalduse, tugevuse, tiheduse, soojusisolatsiooni ja teiste näitajate kujundamisel. Absorbtsioon on üks peamine vee ja veeauru transpordimehhanisme, mis saab toimuda betoonis kapillaarpooride esinemise tõttu, mille tulemusel täituvad kivinenud betoonis olevad tühimikud. [14]

Lagunemisprotsesside kulgu kiirendab oluliselt nii betooni suur kapillaarpoorsus kui ka betooni varajane asetamine agressiivsesse keskkonda. Väliskeskkonnaga kokkupuutes transporditakse kapillaarjõudude abil vesi ja agressiivsed vesilahused tsemendikivisse, kus need erinevate füüsikaliste ja keemiliste protsesside tulemusena muudavad tsemendikivi struktuuri ja koostist. [4]

Märgunud konstruktsiooni külmumisel tekivad selle poorides jääkristallid, mis toovad endaga kaasa sisepingeid materjalis ja viivad pideva külmumis-sulamistsükli kordumisel materjali purunemiseni. Piisava niiskuse olemasolu on ka eelduseks sarruse

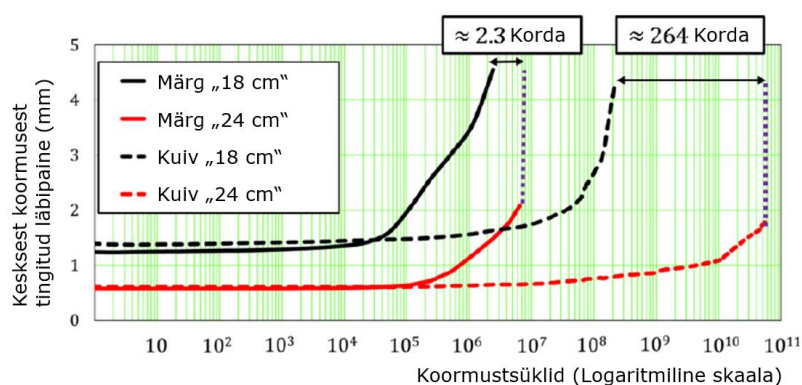
roostetamisele. Betooni läbivad veehulgad pesevad välja kaltsiumhüdroksiidi, mis põhjustab betooni lagunemise, samuti võib vesi betoonist välja uhtuda sideainet. [15]

## 2.6 Vee kogunemine pindadele

Veesisalduse ja sellest tingitud lagunemisprotsesside kulg ja kiirus on erinevad sõltuvalt pindade horisontaalsetest ja vertikaalsetest asetustest. Horisontaalsetel pindadel toimub suurem vee kogumine ja seeläbi ka pinna (materjali) pikaaegne kokkupuude veega ning lisaks agressiivse keskkonnaga. [4]

Pindade kaitseks märgumise eest on väljatöötatud mitmeid vett hulgavaid meetmeid ja materjale, kuidas betooni seisva vee eest kaitsta. Sellegipoolest tuleb tõdeda, et tihtipeale on nende meetmete ja materjalide eluiga lühem kui konstruktsiooni enda oma. Seega on perioodilised parandustööd ja isolatsioonimaterjalide väljavahetamine olnud praktikas vältimatu tegevus. [16]

Horisontaalpindadele tekkiva seisva vee mõju konstruktsiooni elueale on oluliselt lühem, kui seda on konstruktsiooni puhul, kus ei teki seisvat vett. Uuringud on näidanud, et raudbetoonist konstruktsioonide eluiga väheneb sellisel juhul 0,5%. Seisva vee mõju uurimiseks on tehtud katseeksperimente raudbetoon sildadega, kus võrreldi omavahel õhukest (18 cm) ja paksemat (24 cm) raudbetoonist sillatekki. [16]



Joonis 2.4 Vee mõju väsimusele [16]

Tulemustest järeldus, et 18 cm ja 24 cm sillatekkide väsimuste erinevus märjas olekus oli 2,3-kordne, samas kui kuivas olekus oli erinevus 264-kordne. Sellest võib järeldada, et olenemata konstruktsioonikihi paksusest on vee mõju materjali pinnale kriitiline, vähendades seeläbi materjali või konstruktsiooni osa vastupidavusvõimet.

Vee kogunemine betoonpindadele tekib mitmel erineval viisil. Peamine põhjus on ebapiisav vee äravoolu süsteem, mis võib tuleneda halvasti konstrueeritud või vigaselt paigaldatud drenaažisüsteemist, seda nii hoone katusel, fassaadil kui ka maa-aluses osas. Raudbetoonkonstruktsioonide puhul võib stagneerunud vesi koguneda lamekatustele, eriti nendesse piirkondadesse, kus katusel pole piisavalt kaldeid või drenaažikanaleid, mis võimaldaksid vee tõhusalt eemale juhtida. Kui betoonkonstruktsioonidel puudub hüdroisolatsioon või vee äravool on takistatud, võib stagneerunud vesi otseselt kahjustada betoonpinda, põhjustades kahjustusi ja deformatsioone. Pidev vee olemasolu betooni pinnal põhjustab pragude teket ja betooni pealmise kihi erosiooni. [17]

Kaasaegsetes hoonetes on küll enamasti kasutusel hüdroisolatsioonikihid, mis peaksid vältima stagneerunud vee teket, kuid siiski võib tekkida olukordi, kus vesi koguneb katuse nurkadesse, parapeti horisontaalsele pinnale või muudesse madalatesse kohtadesse. Näiteks võib olla probleeme parapeti servadega, kus halvasti paigaldatud või puuduliku kaitsekihita servad võivad muutuda soodsaks kohaks vee kogunemisele, eriti, kui puudub katuse kalle nendes piirkondades. Sellised kohad võivad tekitada muret, kuna vesi võib koguneda konstruktsiooni äärtesse ja sealt edasi voolata juba konstruktsiooni sisemustesse, põhjustades seeläbi lisakahjustusi. [17]

Hoone parapeti horisontaalsed pinnad jäävad sageli hüdroisolatsioonikihiga katmata, luues sobilikke kohti vee kogunemiseks, millele järgneb vee voolamine mööda konstruktsiooni seina, soodustades seejärel juba uute lagunemisprotsesside kulgu pinnal. Seetõttu on oluline viia katuse hüdroisolatsioonikiht vähemalt kuni parapeti välise servani, lisades omakorda peale veel kattepleki, mis tuleb suunata katuse poole minimaalse kaldega  $> 1/6$ . Kattepleki ulatus üle fassaadi tuleb tagada minimaalselt  $> 70$  mm, et takistada vee valgumist mööda fassaadi pinda. [17]

Seisev vesi on probleemiks ka varikatuste korral, eriti juhul, kui varikatused pole projekteeritud kaldega või kui kalle on hoopis suunatud konstruktsiooni poole. Sellised varikatused koguvad sademevett ning muutuvad vee kogunemise allikateks. Sellisel juhul võib vesi koguneda varikatuste madalamatesse kohtadesse, moodustades seal stagneerunud veekogumeid, mis võivad kahjustada varikatuse konstruktsiooni ja selle alust betoonpinda. [17]

Välised veeäravoolurennid mõjutavad vihmavee äravoolu kulgu, kui need pole õigesti paigaldatud või hooldatud, takistades vee äravoolu, suunates vett valesti ning soodustades selle sattumist hoone perimeetri ümbrusse. Vihmaveerenni minimaalne kalle võiks olla  $> 0,5\%$ . Vesi vihmaveetorst peab suubuma vastuvõtukaevu või

lõppema 20 cm kõrgusel maapinnast, suunates vee hoone konstruktsioonist eemale. On oluline tagada vee eemale juhtimine vähemalt 2,5 m kaugusele hoonest. Lisaks, võib vale kaldenurk hoone perimeetri ümber aidata kaasa vee kogunemisele hoone servadesse ning hoone alustesse piirkondadesse. Pinnasega kokkupuutes olevad agressiivsed kemikaalid kahjustavad betoonipinda, eriti kui vesi jääb pikemaks ajaks seisvaks. [17]

## **2.7 Sademete ja pritsmete mõju**

Konstruktsiooni geomeetria määrab sageli ära, kuidas vihm, lumi või rahe konstruktsioonipindadega kokku puutuvad. Erinevad katusekalded, konstruktsiooni nurgad, kõrgemad ja madalamad kohad konstruktsioonis põhjustavad sademete erisugust käitumist, juhtimist ja voolukiirust konstruktsiooni pinnal.

Tuuled määravad sageli, millist tüüpi sademete mõju konstruktsioon konkreetses oludes kogeb. Need mõjud võivad hõlmata sademete pritsimist, kus konstruktsioonile tekib pritsmevöönd, vee voolamist mööda pinda või sademete tagasipõrkumist pinnalt. [18]

Sademete pritsimine võib tekkida olukorras, kui sademed langevad hoonele teatud nurga all ja põhjustavad pritsmete hajumist kogu konstruktsiooni pinnale. Pritsmete mõjul intensiivistub betooni kui poorse materjali vastuvõtlikkus vee sissetungile. [19]

Vee voolamine mööda betoonpinda võib tekkida olukorras, kus sademed langevad piisavalt kiiresti ja kogunevad konstruktsiooni kaldus või horisontaalsetele pindadele. See võib põhjustada vee kogunemist konstruktsiooni pragudesse või pooridesse, mis aja jooksul põhjustab betooni kahjustusi nagu omakorda uute pragude tekkimist ja betoonpinna erosiooni. Mida pikemalt ja intensiivsemalt vee voolamine toimuda saab, seda suurem on ainete, sealhulgas betooni koostises oleva tsemendikivi, lahustumine. Sademed võivad sattuda ka fassaadidetailide pinnale, mille tagajärjel võib detailidele kogunenud vesi mööda konstruktsioonipinda alla voolata. Seetõttu on ka detailide asetsemine hoone fassaadi suhtes väga tähtis, et vähendada vee voolava mõju toimet. Tuleb tagada selline detaili kinnitusviis, mis suunaks detailile koguneva ja hiljem konstruktsioonile valguva vee seinakonstruktsioonist eemale mitte seina poole. [30], [19], [4]

Mida väiksem sademete kaldenurk tekib, seda suurem tõenäosus on, et sademed põrkuvad konstruktsiooni pinnalt tagasi. See vähendab sademete otsest mõju

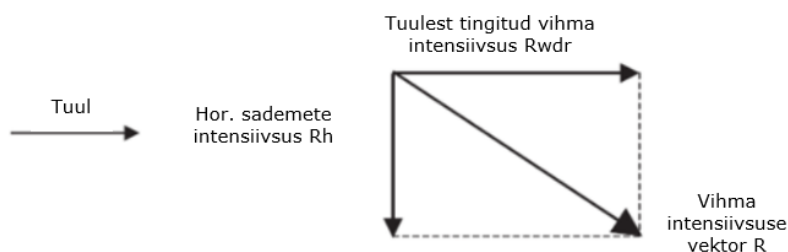
konstruktsiooni pinnale, kuid võib samuti suurendada sademete hajumist ja niiskuse kogunemist ümbritsevale alale. [19]

Mida suurem on veepiisa suurus, seda suurema tõenäosusega hakkavad piisad pritsima ja mööda pinda alla voolama. Erosiooni seisukohalt eraldub veepiiskade kinnitumisel ja pritsimisel rohkem kineetilist energiat kui põrgates, kuna pärast pinnale langemist säilitab piisk osa oma kineetilisest energiast ja jätkab liikumist teatud kiirusega. Seetõttu kannavad suurema läbimõõduga piisad rohkem energiat endaga kaasas fassaadidele kinnitumisel, eriti kõrgemate hoonete nurkadesse, mis võib aja jooksul põhjustada suuremat pinna erosiooni. Lisaks avaldavad suuremad piisad pinnale suuremat survet. [19]

## 2.8 Tuultest tingitud sademete intensiivsus

Sademete ja pritsmete mõju betoonpinnale on paljugi tingitud tuule tugevusest, kaldenurgast ning konstruktsiooni ümbritsevatest teguritest, milleks on peamiselt konstruktsiooni ümbritsevad naaberhooned või puud, mis pakuvad kaitset vihma ja tuulte eest. Lisaks on olenevalt tuulte esinemise suunast märgata pindade suuremat märgumise ulatust. Sademeid ja pritsmeid peetakse hoonete fassaadide pinnaerosiooni peamiseks põhjuseks, eriti esinevate tuulte koosmõjul. Sellegipoolest toimub erosioon pinnal väga pika aja möödudes, mistõttu on aeg domineeriv faktor erosiooni toimumise seisukohalt. [19]

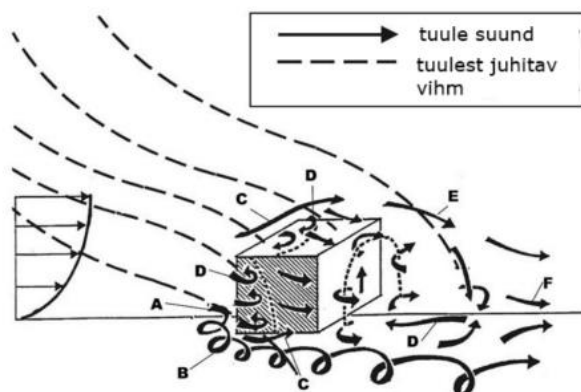
Tuulest juhitud vihm ehk tuulevihm on vihm, millele tuul annab horisontaalse kiiruse komponendi teatud kaldenurga all. Tuule ja vihma koosmõju toob endaga kaasa kaldvihmad. Vihma ja hoone vertikaalsete osade seisukohalt omandab tuulevihm veidi kitsama tähenduse, kui seda muidu nimetada saab. Selle mõistmiseks võib olukorda iseloomustada vektorite näol (Joonis 2.5). [18]



Joonis 2.5 Sademete mõju tuule intensiivsusest [18]

Tuule mõjuga omastab vihma vektor intensiivsema komponendi, mis põhjustab sademete sattumist vertikaalsele pinnale. [18]

Tuuleiilide esinemise korral käitub hoone takistusena, hoone ümber kujuneb spetsiifiline tuulevoolumuster. Sademete esinemise korral tekitab tuulevoolumuster olukorra, kus fassaadi eriosadele langevad erineva intensiivsusega sademed ning toimub ebaühtlane hoone fassaadi niiskumine (Joonis 2.6). [18]



Joonis 2.6 Tuulevoolu muster hoone ümber ja sademete trajektoor sõltuvalt tuulevoolust, voolumuster sisaldab tuulekeerist (A), nurgavooge (B), eraldumist hoone nurkadest (C), retsirkulatsiooni tsoone (D), nihke kihte (E) ja kaugemaid tsoone (F) [18]

Mitmete eksperimentide läbiviimisel on uuritud vihma kaldenurga mõju sademete interaktsioonile vertikaalse pinna korral. Tulemused näitavad, et  $25^\circ$ ,  $35^\circ$  ja  $45^\circ$  kaldenurgaga vihma korral domineerib sademete pritsimine konstruktsiooni pinnale. Katsete käigus täheldati, et 82% vabastatud piiskadest põhjustas pritsimist, samas kui ülejäänud 12,5% piiskadest voolab piki pinda alla. Kaldenurga  $15^\circ$  korral langeb pritsivate sademete osakaal 67%-ni, tagasi pörkuvate pritsimete osakaal veidi suureneb, kuid voolavate sademete osakaal jääb muutumatuks. Veelgi väiksema kaldenurga  $5^\circ$  korral väheneb pritsivate sademete osakaal järsult 29%-le ning pörkuvate osakaal tõuseb 63%-ni. Võib järeldada, et suurte tuulekiiruste korral, mis tekitavad ka suurema vihmajärgu kaldenurga, toimub enamjaolt konstruktsiooni vertikaalsele pinnale sattumisel pritsimise efekt, samas kui väiksema tuulekiirusega sademed, mis satuvad pinnale ka väiksema kaldenurga all, kipuvad enamjaolt pinnalt tagasi pörkuma. Sademed, mis langevad pinnale ligikaudu  $45^\circ$  nurga all, kannavad suurema osa oma vabanevast kineetilisest energiast konstruktsiooni pinnale ning tekkiva pöördejõu tõttu toimub pinna erosioon. [18]

Tuulevihma mõju mõõtmiste tulemusel on kindlaks tehtud, et tuulevihma esinemine toob endaga kaasa järgnevad fassaadi märgumise iseärasused:

- tuulepoolne fassaad märgub suuremal määral, samas kus teised fassaadiküljed jäävad suhteliselt kuivaks;
- tuulepoolsel fassaadil suureneb märgumine alt üles ja keskelt külgedele, tavaliselt märguvad enim hoone ülemised nurgad, millele järgnevad ülemised ja külgmised servad;
- kõrgete ja laiade hoonete puhul toimub tuulepoolse fassaadi märgumine peamiselt nurkades ja ülemistes ning külgmistes servaosades;
- tuulevihma intensiivsus suureneb ligikaudu proportsionaalselt vastavalt tuule kiiruse ja sademete intensiivsusega. [18]

## 2.9 Kloriidide sissetung raudbetooni

Kloriidide sissetung betooni saab toimuda nii väliskeskkonnast sisse imendumise teel kui ka betoonisegu tootmise käigus. Igal juhul on kloriididel küllaldane mõju, ja seda just negatiivses võtmes, raudbetooni korrosiooniprotsessi toimumisel. Väliskeskkonnast tingituna tungivad kloriidid raudbetooni kas mereveega kokkupuute korral, jäitevastaste soolade mõjul, mida kasutatakse teede sulatamiseks talvisel perioodil või kemikaalide otsesel kasutamisel raudbetoonpinnal. [20]

Võttes arvesse keskkonnaklassi ja kloriidide sisaldust, on Eurokoodeks 2 välja toonud soovituslikud minimaalsed kaitsekihipaksused, et tagada kloriididest põhjustatud armatuurterase korrosioonikaitse (Tabel 2.10). [12]

Tabel 2.10 Minimaalsed betooni kaitsekihi paksused vastavalt standardi *EVS-EN 206* poolt määratud kasutusklassidele [12]

Riskiallikas	Betooni kasutusklass	Minimaalne kaitsekihi paksus, mm	
		Raudbetoon	Eelpingestatud betoon
Kloriidide põhjustatud korrosioon	XS1, XD1	35	45
	XS2, XD2	40	50
	XS3, XD3	45	55
* Antud väärtuseid peaks suurendama 10 mm võrra saamaks nominaalne kaitsekihi sügavus			



Korraliku betoonist kaitsekihi tagamine armatuurile on üks mõjuv faktor, millega saab vähendada kloriidide armatuurini jõudmise aega betoonis. Paksema kaitsekihi olemasolu suurendab märkimisväärselt kloriidioonide vastupanuvõimet, mis vähendab nende kiirust armatuurini jõudmisel. Võrreldes 25 mm paksuse kaitsekihiga võib 50 mm paksune kaitsekiht kloriidide sissetungimise aega betoonis umbes neli korda pikendada. [21], [6]

Ameerika standardi *ACI 224* kohaselt on jäitevastaste soolade või mereveega kontaktis olevas keskkonnas maksimaalne lubatud praod betoonis 0,02 mm. Seevastu väidavad teadlased, et betoonis olevad praod laiusega alates 0,05 mm suurendavad juba tunduvalt kloriidide sissetungimise kiirust betooni. [21]

Alapeatükis 2.4 on väljatoodud minimaalsed nõutavad kaugused hoonete või rajatiste suhtes kloriidide ulatusemõjust konstruktsiooni pinnale, millega tuleb projekteerimisel arvestada.

Kloriidikindluse suurendamiseks betoonis on võetud kasutusele ka mitmed erinevad inhibiitorid (lisandid), mis kujutavad endast keemilisi ühendeid, millega aeglustatakse kloriidide sissetungi ja pikendatakse korrosiooni tekke algust. [22]

Kloriidisisaldus kloriididega saastunud vees või lumes, mis on põhjustatud talvisest tee soolatisest, on palju suurem, kui merevee kloriidisisaldus. Täpne kloriidide mõju hindamine on väga raske, sest soola hulka, mida kasutatakse, on raske hinnata selle hooajalise kasutamise tõttu. Kui konstruktsioonelement on vaheldumisi kokkupuutes kloriidide sisaldava lahusega ja kuival perioodil atmosfääriga, kus vesi betooni pinnakihtidest aurustub, siis toimub kapillaarne imendumine iga järgneva betoonpinna märgumise korral. See protsess võimaldab kiiresti kloriididel tungida betooni sügavamatesse kihtidesse. [7]

Peamiselt tunneb kloriidide sattumise betoonpinnale ära ennekõike soolade ladestumise ilmingutest, mis võivad hõlmata valgete või hallikate kristallide moodustumist (Joonis 2.7).



Joonis 2.7 Jäitevastaste soolade ladestumine betoonpinnale [autori foto]

Kloriidide esinemist betoonpinnal iseloomustavad ka värvuse muutumised, mille korral tekivad tumedamad ning laigulised kohad betoonpinnal. Pidevalt kloriididega kokkupuutes olevatel hoone osadel tekib pinnakvaliteedi halvenemine, pealmine betooni kiht hakkab murenema ning tekivad praod, mille tulemusel saab toimuda ka pinna erosioon, kuna betooni struktuur on nõrgenenud. Kirjeldatud ilmingud on siiski kõik erineva raskusastmega ning sõltuvad kloriidide kontsentratsioonist, kokkupuute kestusest ja muudest teguritest. [21]

## 2.10 Õhusaaste ladestumine betoonpinnale

Õhusaaste moodustavad enamjaolt looduslikud ja inimtekkelised atmosfääris olevad gaasilised, tahked ja vedelad osakesed, mis kõik avaldavad raudbetoonkonstruktsiooni pinnale negatiivset mõju, olenevalt betooni koostisest ning saasteosakeste osakaalust. Õhusaaste suuremal määral on siiski inimtekkeliste protsesside tagajärg.

Saasteained tekivad ümbritsevasse keskkonda sageli tööstuslikest protsessidest, põlemisest ja keemilistest reaktsioonidest. Tööstusettevõtete tehased eraldavad atmosfääri mitmeid saasteaineid, sealhulgas suures koguses süsihappegaasi, vääveldioksiidi, lämmastikoksiide, lenduvaid orgaanilisi ühendeid ja palju muud. Linnakeskkonnas on suurimad heitainete allikad sõidukid ja nende heitgaasid. Mitmed transpordivahendid, linnapildis siiski autod, eraldavad kütuse põlemisest õhku süsihappegaasi, lämmastikoksiidi, vääveldioksiidi ja tahkeid osakesi. Põllumajanduses saab õhusaaste alguse põllumajandustegevusest, mis pärineb peamiselt väetiste kasutamisest ja loomade väljaheidetest, mille tulemusel eralduvad ammoniaagi osakesed atmosfääri. Saasteained satuvad ümbritsevasse keskkonda ka kütteallikate näol, mis eraldavad õhku CO<sub>2</sub>, tahkeid osakesi ja muud. [22]

Need osakesed kleepuvad konstruktsioonide pindadele, kujundades saasteainete kihte, mis võivad põhjustada korrosiooni või keemilisi reaktsioone konstruktsiooni

materjalidega. Õhus leiduv süsihappegaas (CO<sub>2</sub>) kiirendab betooni karboniseerumist, samas kui väävli- ja lämmastikühendid reageerivad veega, moodustades agressiivseid happeid [22].

Keemiline reaktsioon atmosfääris leiduva CO<sub>2</sub> ja betoonis sisalduva tsemendikivi vahel tekitab betoonikivi karboniseerumist. Karboniseerumise osakaal sõltub tugevalt suhtelisest õhuniiskusest, kuna karboniseerumine toimub 40...70% suhtelise õhuniiskuse vahel. Karboniseerumine saab alguse betooni pinnalt ning liigub järk-järgult sügavamatesse kihtidesse, mille kiirus oleneb juba betooni pinnatihedusest ja kasutatud tsemendi koostisest. Karboniseerumine alandab betooni pH taset, mis omakorda vähendab selle passiveerivat toimet, muutes betoonis sisalduva terase korrosioonile vastuvõtlikuks. Siinkohal tuleb silmas pidada, et terase korrosioon ei saa toimuda enne, kui karboniseerunud betoonikiht ei ole kokku puutunud niiske keskkonnaga. Korrosioon terase pinnal saab toimuda vaid vee juuresolekul. [23], [22]

Karboniseerumise kiirus sõltub paljust, põhilisteks mõjutajateks on siiski betooni koostis ning süsihappegaasi sisaldus õhus. Kõrge tugevusklassiga betooni puhul on karboniseerumise kulg tunduvalt aeglasem, kui seda on madalama tugevusklassiga betooni puhul. Keskmiselt võib arvestada betooni karboniseerumiskiiruseks kuni 1 mm aastas. Tabel 2.11 toob välja erinevate betooni tugevusklasside karboniseerumissügavuste ajaline kulgemise olenevalt ümbritsevast keskkonnast. [22], [4]

Tabel 2.11 Erineva tugevusklassiga CEM I portlandtsementbetooni eeldatav karboniseerumiskiirus mm/aastas [4]

Tugevusklass, C <sub>cub</sub> , MPa	<15	15...20	25...35	>35
Märg/sukeldatud	2	1	0,75	0,5
Pinnases	3	1,5	1	0,75
Atmosfääri tingimustes	5	2,5	1,5	1
Kaetud	10	6	4	3,5
Siseruumides	15	9	6	3,5

Uuringud on kindlaks teinud, et tihedast asutusest kaugel eemal asuva Suure Munamäe vaatetorni karboniseerumissügavus ei ole sugugi nii suur, kui esialgu 60-aastase rajatise puhul arvata võib. Karboniseerumise sügavus oli vaid paar millimeetrit, mis annab kinnitust, et kvaliteetse betooni, saasteainete vaeses keskkonnas raudbetoonrajatise puhul toimub karboniseerumine väga aeglaselt. Isegi 50. aasta möödudes ei ületa karboniseerumissügavus 5...10 mm, kui näiteks vastupidises

olukorras võib betooni karboniseerumissügavus ulatuda 25 mm sügavusele vähema kui 10-ne aasta möödudes. [22]

Lisaks CO<sub>2</sub> põhjustatud karboniseerumiseefektile võib betoonile negatiivset mõju avaldada ka kaltsiumhüdroksiidiga reageeriva lämmastikhappe ja vääveldioksiidi happeline toime, mida tuntakse ka happelihmade nime all. Esimesel juhul põhjustab reaktsioon kaltsiumnitraadi moodustumist, mis on vees väga hästi lahustuv, põhjustades materjali kadu ja poorsuse suurenemist ning muutes betooni nõrgemaks ja vastuvõtlikumaks sügavamate kihtide kahjustustele. Teisel juhul tekib reaktsiooni tulemusel betooni pinnale kaltsiumsulfiiti moodustumine, mis niiskuse ja hapniku juuresolekul võib oksüdeeruda, moodustades betooni pinnale kaltsiumsulfaati (kipsi), mille tunneb ära valgete või hallikate ladestusilmingute järgi. Pinnale tekkinud kipsikiht uhutakse vee toimel pinnalt ning saab alguse uus samataoline protsess, mille korduval tulemusel toimub materjali kulutamine. [23]

Saasteained atmosfääris tekitavad betooni pinnale ladestudes mustuse kihi, mis on rohkem esteetiline probleem kui struktuuriline. Sellegipoolest võib see omakorda luua sobilikud tingimused bioorganismide, nagu vetikad ja seened, kasvuks ja paljunemiseks betooni pinnal. Bioorganismid kahjustavad omakorda betooni pinda edasi ning jätkavad pinna välimuse halvenemist ja struktuurilisi probleeme. [22]

Tuulte ja sademete mõju õhusaaste levikule ja sattumisele konstruktsioonide pinnale on oluline keskkonnategur, mis mõjutab saasteainete mõju ulatust. Mõju intensiivsust ja olemust reguleerivad tuulte suunad ja kiirused, sademete tüüp ja nende intensiivsus, saasteallikate asukoht ja liik. Sademed nagu vihm, lumi, rahe, eemaldavad atmosfäärist saasteosakesed ning kannavad need endaga pinnale. See protsess ühest küljest puhastab ümbritsevat õhku, kuid soodustab sealjuures saasteainete ladestumist konstruktsioonide pinnale. Suurem tuulekiirus hajutab saasteained atmosfääris ja madala tuulekiiruse korral soodustab saasteainete ladestumist pinnale ning selle vastastikumõju aega konstruktsioonimaterjalile. Seega pikeneb kokkupuuteaeg madalamate tuulekiiruste korral ning kahjustused materjali pinnale on suurema mõjuga. [24]

## **2.11 UV-kiirgus ja temperatuuri muutused betoonpinnal**

Peamiseks ehitisele mõjuvaks kiirguseks on päikesekiirgus ehk ultraviolettkiirgus (UV), mis eriti polümeersete materjalide puhul on üheks materjali lagundavaks asjaoluks. UV-

kiirgus on lühikese lainepikkusega ja suure energiaga kiirgus, mis moodustab umbes 5% päikese kiirgusest. Kiirguse toimel asetleidvad vananemisprotsessid halvendavad nii ehitusmaterjalide välisilmet kui ka kestvust. [4]

Suurte temperatuurikõikumiste intensiivsus betoonkonstruktsioonide pinnal võib sõltuda mitmetest teguritest:

- konstruktsiooni asukoht: UV-kiirguse intensiivsus ja päikesekiirguse kestus sõltuvad geograafilisest asukohast, kliimast ja aastaajast. Näiteks lõunapoolsemad piirkonnad võivad kogeda suuremat päikesekiirgust ja kuumemaid temperatuure, mis võivad suurendada UV-kiirguse ning temperatuurimuutuste mõju raudbetooni pinnale;
- aastaaeg: mõjutab päikesekiirguse intensiivsust ja kestust. Suvekuudel ja päikesepaistelistel päevadel võib UV-kiirguse ja temperatuurimuutuste mõju olla intensiivsem kui talvekuudel või pilves ilmaga;
- konstruktsiooni orientatsioon: konstruktsiooni suund erinevate ilmakaarte suhtes mõjutab päikesevalguse otsest mõju selle pinnale. Erinevad orientatsioonid võivad põhjustada erinevat UV-kiirguse ja temperatuurimuutuste intensiivsust ja jaotust konstruktsiooni erinevates osades;
- atmosfääri suhteline õhuniiskus: suhteline õhuniiskus võib samuti mõjutada temperatuurimuutuste mõju, kuna niisked tingimused võivad põhjustada betoonpinna kiiremat jahtumist ning külmumist;
- pilvisus: pilvisus vähendab päikesekiirguse intensiivsust ja võib vähendada ka kõrgete temperatuuride mõju raudbetoonpindadele;
- tuulte mõju: tugevad tuuled võivad põhjustada kiiret õhuvoolu konstruktsiooni pinnal, mis omakorda võib kiirendada pindade jahutamist. See võib vähendada päikese poolt põhjustatud soojuskoormust ja temperatuurimuutusi konstruktsiooni pinnal. Tuultega võib kaasned ka temperatuuri hajutamine, kuna tuuled võivad kanda endaga kaasa tolmu, suitsu, ja muid õhus lenduvaid osakesi, mis võivad vähendada päikesekiirguse intensiivsust konstruktsiooni pinnale;
- pinnamaterjal ja viimistlus: konstruktsiooni pinnamaterjal, värv ja viimistlus võivad mõjutada selle reaktsiooni UV-kiirgusele ja temperatuurimuutustele.

Näiteks tumedamad pinnad neelavad rohkem päikeseenergiat ja võivad seetõttu kuumeneda rohkem kui heledamad pinnad;

- ümbritsevad objektid: hooned võivad olla varjatud teiste hoonete või objektide poolt, vähendades seeläbi päikese otsest mõju nende pinnale või vastupidi, olla avatud päikesekiirgusele pikema aja vältel. [25], [26], [27]

Päikesekiirguse mõju betoonkonstruktsioonidele võib alguse saada juba betooni kivinemisperioodi etapis. Kivinemisperioodi oluline etapp betooni valmistamisel on hüdratatsioonireaktsioonide käigus, kus vesi reageerib sideainega (tsemendiga), moodustades tugeva ja vastupidava betoonimassi. Päikese soojuskiirguse intensiivse mõju all võib vee kiire aurustumine betoonist takistada nende reaktsioonide toimumist, mis toob endaga kaasa mahukahanemispraod ja pinna tolmamise. Aurustumisele aitab omakorda kaasa tugev tuul, mis kiire õhuliikumise korral soodustab vee aurustumist betoonist. See võib põhjustada betooni struktuurilist nõrgenemist, mis suurendab betoonkonstruktsioonide tundlikkust ümbritseva keskkonna suhtes. [25], [26]

Kivistunud betooni puhul lõhub UV-kiirgus peamiselt betooni polümeere ja sideahelaid. Polümeersed materjalid neelavad UV-kiirgust ja lagunevad, kuna nende komponendid reageerivad õhuhapnikuga. [4]

Päikesekiirguse toimel muutub UV-kiirguse pika mõju all olev betoonipind rabadaks, tekivad praod ning betooni struktuur nõrgeneb, mis lagundab betoonpinna aeglaselt tolmuks. Lisaks struktuurilisele halvenemisele kaotab pideva tugeva päikesekiirguse all olev betoon ka oma esteetilise väljanägemise, betoonis olevad orgaanilised pigmendid tuhmuvad ning võivad muutuda lausa kollaseks. [27]

Eestis on suvisel perioodil kõige intensiivsemad UV lainekiirgused, mille tulemusena kuumeneb betoonipind. On kindlaks tehtud, et õhutemperatuuride 27...32 °C võib raudbetoonkonstruktsiooni pinnatemperatuur tõusta kergesti üle 60 °C, mille tulemusel betoon kuumuse käes laieneb ning tekivad pinged, mis viivad betooni pragunemiseni. [28]

Temperatuur betoonis muutub alati koos ümbritseva keskkonna temperatuuriga ning jääb teatud aja möödudes ümbritseva temperatuuriga samaks. [6]

Temperatuuri muutumisest tingitud muutustega raudbetoonis kaasnevad:

- betooni mahumuutused, mis võivad esile kutsuda materjali pragunemist, tema mõõtmete vähenemist või suurenemist;

- betoonis sisalduva vee faasimuutused (aur-vesi-jää);
  - temperatuuri tõus soodustab lagunemisprotsesside algamist (biodegradatsioon).
- [4]

Betoonkonstruktsioonide reageerimist temperatuuri kõikumistele iseloomustab materjali soojuspaisumistegur, mis väljendab materjali pikenemist või lühenemist vastavalt temperatuuri muutustele. Betooni soojuspaisumistegur ja selle lineaarne laienemine võivad põhjustada konstruktsiooni pikenemist või lühenemist temperatuuri muutudes. Kui seda ei võeta arvesse õigesti, võivad tekkida pinged, mis viivad pragude tekkeni. Betooni soojuspaisumistegur on  $\alpha = 10^{-5} K^{-1}$ . Temperatuuri kõikumisel konstruktsioon pikeneb või lüheneb, näiteks 50 m pikkune betoonsein pikeneb temperatuuri tõusmisel 20 °C võrra 10 mm. [15]

Temperatuurimuutustega betoonis on seotud ka betooni karboniseerumine, kloriidide sissetung ja armatuurvarraste korrosiooniprotsessid, mis kõik mõjutavad oluliselt betoonkonstruktsioonide vastupidavust. Üldiselt suurenevad kõik eelpool nimetatud protsessid temperatuuri tõustes. Karboniseerumise kiirenemise mõju sõltuvalt temperatuuri muutustest uuriti lähemalt artiklis „Vulnerability of structural concrete to extreme climate variances“, kus katsete tulemusel jõuti järeldusele, et betooni karboniseerumise sügavus suureneb koos ümbritseva temperatuuri tõusuga, mis omakorda võib kiirendada ka korrosiooniprotsessi algust. [6], [29]

## 2.12 Biodegradatsioon raudbetoonil

Biokahjustuste esinemise osaline põhjus tuleneb teadmiste puudusest, kuid sageli juhtub, et olemasolevaid teadmisi ei rakendata või rakendatakse väärsti. Ajalooliselt on vanade hoonete ehitamisel järgitud aastasadade jooksul välja kujunenud tavasid ja ehitusvõtteid, mis on võimaldanud neil biokahjustustele vastu pidada. Põhitõed on lihtsad – hoida konstruktsioone kuivadena, tagada kahjustusohlike hooneosade ümber piisav õhuvool ning võimaldada hügrokoopsetel materjalidel "hingata". Projekteerimis- ja ehitusvead, ebapiisav hooldus ning hoonete ebaõige kasutamine viivad aga paratamatult olukorrani, kus biokahjustused muutuvad üha sagedasemaks ja tõsisemaks. [30]

Bioloogiline lagunemine, tuntud ka kui biodegradatsioon, viitab protsessile, kus organismide elutegevus põhjustab materjali pinnal kahjustusi. See võib hõlmata vetikate, seente, samblike ja teiste organismide kasvu poolt tekitatud kahjustusi ning erinevaid bakteriaalseid rünnakuid. Bioloogiline korrosioon tekib siis, kui orgaanilise

päritoluga aine ja mikroorganismid, nagu taimed, seened, vetikad, kasutavad materjali toiduna või tekitavad lagundavaid keemilisi ühendeid oma elutegevuse tulemusel, põhjustades seeläbi materjali lagunemist. [4]

Biodegradatsiooni mehhanisme saab klassifitseerida vastavalt nende mõjule materjalile, need võivad olla:

- füüsikaline või mehaaniline kahjustumine;
- esteetiline, mida soodustavad hallitus, seened, vetikad ja muud peamised biomassi tootjad, mis põhjustavad materjali pinna mustumist või määrdumist;
- keemiline, mis toimub siis, kui mikroorganismid kasutavad betoonmaterjale kasvupinnana või eritavad kahjulikke aineid materjali, kahjustades selle struktuuri; [31]
- mitmesuguste orgaaniliste setete alune betoon on püsivalt märg.

Betooni lagunemise oluline aspekt on kahjustus materjali sisemisele struktuurile, mis sageli viib pooride suurenemiseni, vähendades tugevust ja soodustades pragunemist ning kloriidide sissetungimist. [31]

Kõikides biokahjustustes on olulised tegurid materjal, mida rikutakse, organismid, kes rikuvad, ning keskkond, mis mõjutab nii organismide kui ka materjalide käitumist (Joonis 2.8). Keskkonnateguritest, mis mõjutavad organismide tegevust, on kõige olulisemad vesi ja niiskus, temperatuur, hapnik ja valgus. [30]



Joonis 2.8 Biokahjustuse situatsioon [30]



Soe ja niiske kliima soodustab, kuiv ja külm kliima pidurdab biokahjustuste teket. Ultraviolettkiirgus on kõikidele organismidele kahjuliku toimega, sest tekitab biomolekulides ebasoovitud muutuseid. [30]

### **2.12.1 Hallitus**

Hallituseks nimetatakse teatud liiki mikroseeni, täpsemalt silmaga nähtavate seente kolooniate kasvamist nii materjali pinnal kui ka selle sisemuses. Hallitusseened on looduslik osa meie keskkonnast ning neid esineb nii välis- kui ka sisekeskkonnas. Nende väga pisikesed eosed, mis on umbes tuhat korda väiksemad kui millimeeter, levivad oma kerguse tõttu vabalt kõikjal õhus. Kui need eosed satuvad niiskele või märjale orgaanilist ainet sisaldavale pinnale, hakkavad need kiiresti kasvama, tekitades mitmesuguseid värvilisi laike ja plekke. Lisaks võib hallitus tekkida ka pindadele, mis ei sisalda toitaineid, kuid mis on piisavalt karedad, et koguda orgaanilist saastet ja säilitada sinna kogunenud vett. Toitainet võib pärineda materjali enda seest või jõuda selle pinnale koos õhuga, näiteks õhusaaste kaudu. [32]

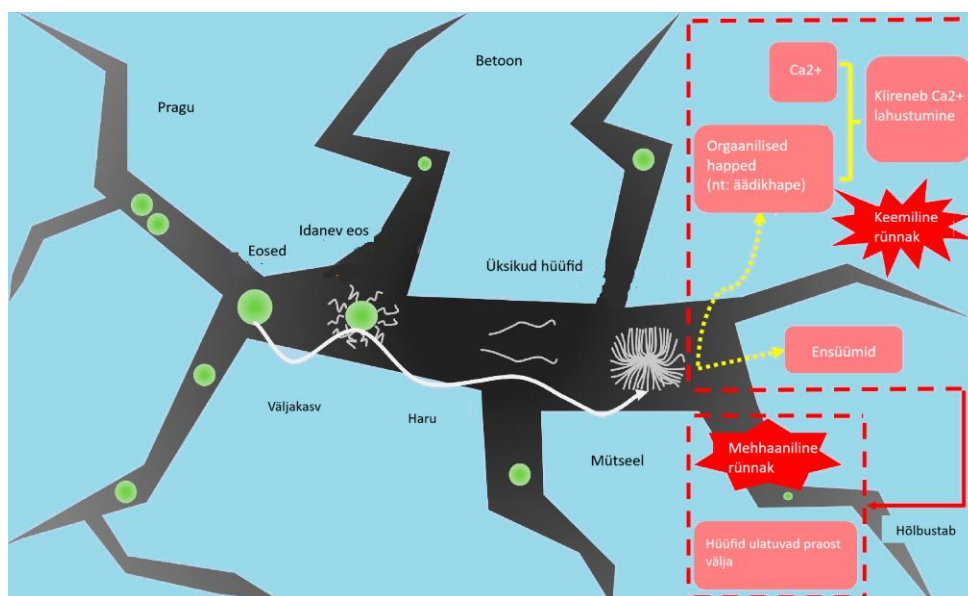
Kui hallitanud materjal kuivab, lendavad selle pinnalt kergesti eosed, mis on vastupidavad kuivusele ja võivad levida uutesse soodsatesse (niiskettesse) kohtadesse, kus nad hakkavad uuesti kasvama. Hallitusseente eoste hävitamiseks on vajalik kõrge temperatuur, üle 100 °C. Hallituskahjustuste ilmnemine konstruktsioonidel on alati seotud ülemäärase niiskuse olemasoluga. Liigne niiskus võib olla peidetud materjali sees, kogunenud pinnale õhukese veekilena või esineda pindu ümbritsevas õhus veeauruna. Hallitusseente arenguks vajaliku niiskuse hulk varieerub erinevatel hallitusseentel ja nad on temperatuuri suhtes erineval määral leplikud. [32]

### **2.12.2 Seened**

Sarnaselt bakteritele võivad ka seened moodustada kolooniaid ja põhjustada seeläbi betooni lagunemist keskkondades, kus on piisavalt toitaineid, see tähendab energiaallikaid ja orgaanilisi süsinikallikaid ning soodsad temperatuuri- ja niiskustingimused. Mikroskoopiliste uuringute käigus on teadlased kindlaks teinud, et seente poolt eritatud orgaanilised happed tekitavad betoonile kahjustusi. Omavahel võrreldi ka bakterite ja seente mõju betooni korrosioonile. Jõuti järeldusele, et betooni korrosioon oli seeni sisaldavates keskkondades tõsisem kui baktereid sisaldavates keskkondades. Betooni massikadu baktereid ja seeni sisaldavates proovides 147-päeva jooksul oli vastavalt 18% ja 24%. Seened põhjustasid betoonis suuremat massikadu, mis võib olla tingitud  $C_a^{+2}$  vabanemisest. Seente mittesuguline paljunemine

on levinud protsess, mis toimub kiirelt. Seened võivad hakata idanema eostest ning seeläbi tekitada hüüfe ehk seeneniidistikku. Kuna hüüfid on väikesed, võimaldavad need seenel kasvada betooni pragudes ja lõhedes. [33]

Seened mõjutavad betooni biokorrosiooni kahel erineval viisil. Esimene tüüp viitab betooni lagunemisele korrosiooniproduktide poolt, mis tekivad betooni ja seente eritatavate orgaaniliste hapete vahelisel reaktsioonil. Enamik orgaanilisi happeid võib reageerida kaltsiumioonidega ( $Ca^{+2}$ ) moodustades vees lahustuvaid sooli, mis põhjustavad kaltsiumiühendite eraldumist ja betooni lagunemist. Samuti võivad orgaaniliste hapete moodustumist mõjutada seene tüüp ja keskkonnatingimused. Teine tüüp hõlmab seeneniidistiku arengut betooni pragudes, mis kasvades ja paljunedes avaldab mehaanilist survet. See laiendab veelgi pragude ulatust ja põhjustab betoonkonstruktsiooni kahjustusi. Seeneniitide läbimõõt jääb vahemikku 2...6  $\mu\text{m}$ . Betonis esinevad praod ulatuvad mõnest mikronist kuni isegi mõne millimeetrini. Kui praod betoonis sisaldavad omakorda vett, soodustab see seente kasvu. [33]



Joonis 2.9 Seente poolt mõjutatud betooni korrosiooni skemaatiline illustratsioon [33]

Joonis 2.9 kujutab betoonis seente koloniseerimist ning kahel erineval viisil seente poolt mõjutatud betooni biokorrosiooni.

Seente ainevahetuse tulemusel muutub ka materjali pH, mis omakorda soodustab bakterite kasvu. Koos bakteritega toimub betooni lagunemine veelgi kiiremini. Varasemalt on katsetatud erinevate bakterite ja seente koosmõju lagunemisprotsessile ning on täheldatud, et pärast 90-ne päevast betoonpinna kokkupuudet seente ja

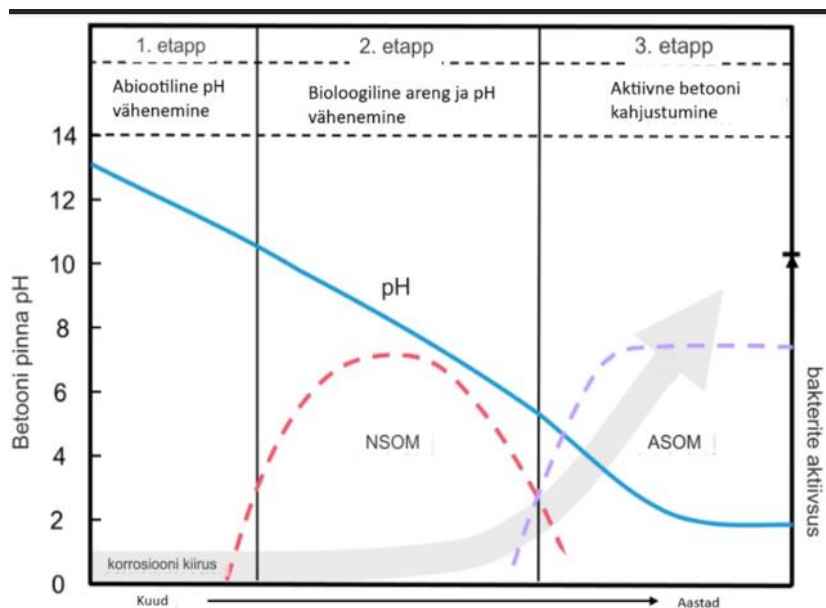
bakteritega oli betooni massikadu 7,2%, samas kui massikadu ilma seenteta oli 1,0%. Seente ja bakterite koostoimel võib osakeste koloniseerimine toimuda lühikese aja jooksul, mille tulemusel tekivad praod betooni ning moodustub keemiline ühend kaltsiumoksaat, mis kiirendab kaltsiumioonide lahustumist, mille tulemusel väheneb betooni tugevus. Lisaks on kindlaks tehtud, et teatud liiki seente puhul tekib betoonpinnale nii-öelda musta värvi biokile kiht, mille mõjul langeb pH 12-lt 8-le, tuues kaasa betooni massikao 6,2 g aastas. [33]

### **2.12.3 Bakterid**

Organismide ainevahetuse tulemusena tekkinud väikesed molekulid ehk metaboliidid põhjustavad betooni pinna pH langust. PH muutused mõjutavad tugevalt mikroobide arvukust ja domineerivaid liike, millest paljud on seotud väävli ja lämmastiku metabolismiga. [34]

Betoonpinnalt on leitud nii neutrofiilseid väävli oksüdeerivaid mikroorganisme kui ka atsidofiilseid väävli oksüdeerivaid mikroorganisme. Neutrofiilsed väävli oksüdeerivad mikroorganismid (inglisekeelne lühend NSOM) on bakterid, mis suudavad oksüdeerida väävliühendeid neutraalses või kergelt leeliselises keskkonnas. Atsidofiilsed väävli oksüdeerivad mikroorganismid (inglisekeelne lühend ASOM) on bakterid, mis suudavad oksüdeerida väävliühendeid happelises keskkonnas. [33]

Esimestel kasutusaastatel on raudbetoonkonstruktsioonide betoonpind tugevalt aluseline, pH jääb vahemikku 11...13, mis takistab mikroobide paljunemist. Sellegipoolest väheneb betoonpinna pH järk-järgult erinevate keemiliste rünnakute tõttu. Bakterite kasvuks on soodne pH väärtuse 9. Koos niiskuse, sobiva temperatuuri ja toitainetega toimub NSOM-i paljunemine, mille ainevahetuse tulemusel väheneb betoonpinna pH veelgi, langedes 4...5-ni. Sellise madala pH väärtuse korral on loodud täiuslik kasvukeskkond omakorda ASOM-le (Joonis 2.10). [33]



Joonis 2.10 Kolmeastmeline betooni biokorrosiooni mudel [33]

Väävliit oksüdeerivad bakterid toodavad energiat, oksüdeerides redutseeritud anorgaanilisi väävliühendeid (väävliit ja tiosulfaati). Biogeenne väävelhape, mis on mikroobide metabolismi lõppsaadus koos väävliit oksüdeerivate bakteritega, reageerib edasi kaltsiumkarbonaadiga, mille tulemuse saaduseks on kips. Biogeenne väävelhape võib siseneda betooni ka läbi pragude ja reageerida kaltsiumhüdroksiidi ja kaltsiummetasilikaadiga, et toota kipsi. Viimane reageerib täiendavalt silikaatalumiinumoksiidiga, põhjustades betooni paisumist, pragunemist ja lõpuks ka betooni kui materjali rikkumist. Teadlased on kindlaks teinud seosed betooni biolagunemise ja bakteri *Acidithiobacillus Thiooxidans* vahel. Täheldatud on, et kui *A. Thiooxidans* rakkude arv on  $6,8 \pm 0,6$  rakku/cm<sup>2</sup>, on betooni korrosioon tühine, kui *A. Thiooxidans* rakkude arv on  $7,1 \pm 0,7$  rakku/cm<sup>2</sup>, on betooni korrosioon keskmine ning kui *A. Thiooxidans* rakkude arv on  $7,7 \pm 0,5$  rakku/cm<sup>2</sup>, saab toimuma tugev betooni korrosioon. [33]

Nitritiseerivad bakterid oksüdeerivad ammoniaaki ja nitritit energia tootmiseks ning toodavad lämmastikhapet. Hape reageerib aluseliste materjalidega nagu betoon. Saadud reaktsioonist tekib kaltsiumnitraat, mis on vees väga hästi lahustuv. Vihm peseb nitraadid betoonpinnalt maha, põhjustades nii betooni massikadu. Simulatsioonikatsed on näidanud, et nitritiseerivad bakterid rikuvad betooni lämmastikhappe tootmisega. Söövitav toime oli võrreldav biogeenne väävelhappe rünnakuga. [33]

## 2.13 Kõlmumine ja sulamine

Betooni kõlmakindluse all mõistetakse betooni vastupidavust vahelduvatele kõlmutamise ja sulatamise tsüklitele. Betooni kapillaarpooridesse kogunenud vee kõllastumisel vesi paisub ja põhjustab survet pooride seintel. Betooni kõlmakindluse hindamisel esinevad kahte liiki kahjustused: pinnakoorumine ja sisestruktuuri kahjustus. Mõlema nähtuse vahel on ka teatav funktsionaalne side. Kõlmumisega ja sulamisega kokkupuutuvate betoonarindite vastupidavus peab olema piisav nende projekteeritud kasutusea vältel. [33]

Betoonkonstruktsiooni kõlmumist ja kõlmakindlust mõjutavad järgmised tingimused:

- jahtumise kiirus, mida järsem on temperatuuri langus ja madalam on negatiivne temperatuur, seda suuremad on kahjustused. Selle põhjuseks on vee kõlmumine ka väiksema diameetriga kapillaarsetes poorides, lagunemine tekib pragunemise kaudu, mille põhjustab mahumuutus, märja betooni termiline püsivus on määrav;
- konstruktsiooni tüüp ja selle paiknemine vee suhtes;
- aeglane ühepoolne kõlmumine märja betooni korral põhjustab kõlmumisfrondi liikumist pinnalt betooni sisse, esineb lagunemine, mis on põhjustatud moodustunud jää paisumisest betooni poorides;
- kiire igakülgne kõlmumine õhukestes betoonkonstruktsioonides võib viia jää moodustumiseni pinnakihi, mis blokeerib poorid ja põhjustab pindmise kihi eraldumist;
- ühekülgse betooni kõlmumise korral võib sellesse kogunenud vesi osaliselt aurustuda, kuid kui aur jahtub välimistesse kihtidesse liikumise korral, võib see moodustada paisuvaid veeläätisi, mis omakorda kahjustavad struktuuri;
- kui kõlmumine toimub vette üleni sukeldatud betoonis, kasvavad purustused mitmekordseks, kuna samaaegselt toimub kapillaarse veeimavuse tõttu uute veekoguste imendumine betooni. [4]

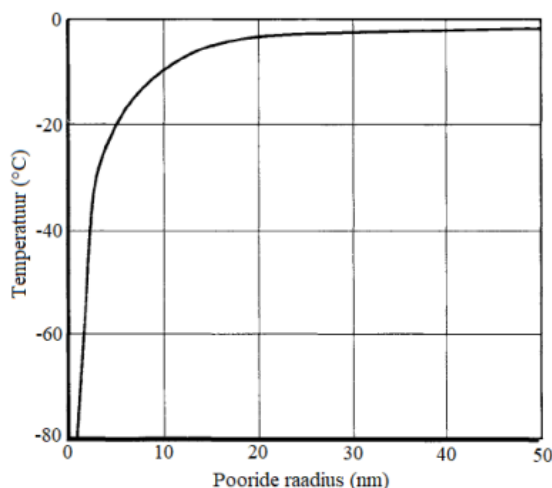
Kõlmakindluse seisukohalt on keskkonnaolud, kus kõlmumine toimub, temperatuuri tase ning kapillaarse veeimavuse olemasolu või puudumine olulised tegurid (materjal on otseses kokkupuutes veega või on betoon vahelduva nivooga tsoonis või on üleni

sukeldatud vette). Betoonkonstruktsioonide võimalikud kokkupuuted veega ja sellest tulenevad erinevused külmumises on järgnevad:

- konstruktsioon asetseb üleni vee all, stabiilselt hapnikuvaese veega küllastunud seisund, mille korral korrosiooni ei esine;
- konstruktsioon on ühelt poolt veega otsekontaktis, põhjustades ühepoolset kapillaarset vee imendumist ja seega ühepoolset külmumist-sulamist;
- konstruktsioon on mõlemalt poolt veega otseselt kontaktis, mis põhjustab kahepoolset kapillaarset vee imendumist ja vahelduvat külmumist-sulamist, mille korral korrosioon võib esineda mõlemal pool;
- konstruktsioon on osaliselt vees, kus toimub vee kapillaarne migratsioon betoonkonstruktsiooni õhuga kokkupuutuvatesse osadesse, mida toetab vee aurustumine pinnalt, külmumisest-sulamisest põhjustatud korrosioonifront on nivoo piiril ja ülalpool seda;
- konstruktsioon on kokkupuutes vahelduva nivoo veega, külmumisfront on vee nivoo alanemisega ülalt alla ja tõus nivoo piirist ülespoole vee sisemigratsiooni tõttu;
- konstruktsioon asub igikeltsas, mida katab sesoonse külmumisega pinnas ja mis ülemises osas on kokkupuutes õhuga, külmumisfront kattub mulla sesoonse külmumistsooniga, õhus olevas osas toimub kapillaartõusust põhjustatud märgunud betooni külmumine-sulamine;
- konstruktsioon paikneb pritsmetsoonis või on ligipääsetav kaldvihmale, toimuvad märgumised vihma või pinnale langevate pritsmetega ja märgunud betooni vahelduv külmumine ja sulamine;
- sademevee kogunemine horisontaalsetele raudbetoonkonstruktsioonidele võib põhjustada betooni niiskumist ja külmakahjustusi. [4]

Vesi võib betoonis liikuda mitmel viisil, sealhulgas kapillaarjõu, temperatuurigradiendi ja hüdraulilise rõhu toimele ning see võib esineda nii auruna kui ka vedelas olekus. Betooni kapillaarsüsteemis on alati teatud hulk vaba vett. Kui betooni temperatuur langeb alla nulli, siis vaba vesi kapillaarides külmub ja vee maht suureneb umbes 9%. Pinged betoonis võivad põhjustada pinna ketendamise, pragunemise või killustamise, kuid ka lõpuks täieliku purunemise. [4], [20]

Kapillaarpooride suurus mõjutab vee külmumistemperatuuri poori sisemuses. Ühtlastel ja väikestel kapillaarpooridel on positiivne mõju betooni külmakindlusele. Joonis 2.11 näitab, kuidas jää moodustumise temperatuur sõltub kapillaarpooride suurusest ja nende sees olevast veest. [35]



Joonis 2.11 Kapillaarpooride suuruse ja külmumistemperatuuri vaheline seos [35]

Väikesed kapillaarpoorid vähendavad vee sissetungi väliskeskkonnast ning takistavad vee liikumist betoonipinna välimistesse kihtidesse külma tõttu. Siiski võib see suurendada pingeid betoonis, kui vee liikumine takistub ja vesi külmub õhumullidesse. [35]

Kloriidsoolade rünnak ja külmumise-sulamise tsüklid mõjutavad üksteist omavahel. Kui poorides leiduv vesi sisaldab lahustunud aineid, muutuvad seetõttu ka külmumise-sulamise temperatuurid. See omakorda suurendab korrosiooniohtu isegi madalatel välitemperatuuridel. [4]

Ühelt poolt vähendab soola olemasolu betooni poorides lahuste külmumistemperatuuri ja leevendab sisemist kahjustust. Ühe uuringu kohaselt vähendab kloriidsoolalahus külmumise-sulamise tsüklite poolt tekitatud sisepingeid, kuna see vähendab jää paisumise kiirust. Siiski suurendab soola olemasolu betooni pooride küllastustaset, seega süvendab sisemist kahjustust. [36]

Teiselt poolt kiirendavad külmumise-sulamise tsüklid kloriidiooni tungimist betooni. Kloriidiooni difusioonikoefitsient betoonis suureneb koos külmumise-sulamise tsüklite arvuga. Sooli sisaldavate külmakahjustuste korral esineb enim probleeme pinnakooremisega, mille tagajärjel kahjustub betoonipind ja kiireneb kahjulike ainete

levik betooni sügavamatesse kihtidesse. Kui soolalahus külmub betooni pinnal, moodustuvad jää-betooni komposiidid. Kui komposiidi temperatuur on madalam kui soolalahuse sulamistemperatuur, siis nii jääkiht kui ka betoon tõmbuvad kokku ning jääkihi kahanemine on umbes 5 korda suurem kui betoonil. Selle tulemusena tekib jääkihile pinge ning see põhjustab betooni pinna pragude laienemist, mis viib lõpuks materjali killustumiseni. [36]

Temperatuuri kõikumised avaldavad betoonile suurt mõju. Külumise ja sulamise korduv toimumine põhjustab betooni struktuuri järk-järgulist muutumist ja kahjustumist. Tugev tuul põhjustab betoon- ja raudbetoonkonstruktsioonide pinna jahtumist, mille tagajärjel konstruktsioonide pinnatemperatuur võib olla palju madalam ümbritseva õhu temperatuurist. Päikeselise ja tuulevaikse ilma korral võib konstruktsioonide pinna temperatuur olla kõrgem ümbritseva õhu temperatuurist. [4]

Tabel 2.12 Tuule kiiruse mõju temperatuurile [4]

Tuul m/s	Temperatuur °C		
	5	0	-5
2	2	-2	-7
4	-1	-7	-12
6	-4	-10	-16
8	-6	-13	-20
10	-10	-15	-23
12	-11	-16	-25
14	-12	-17	-26
16	-12	-18	-27
18	-13	-19	-28

Tugeva tuule ja -5 °C temperatuuriga betoneerides on külmakahjustuste oht palju suurem kui tuulevaikse ilma ja -10 °C temperatuuri korral.



## **3. EHITISTE VISUAALNE UURING**

### **3.1 Objektide valik**

Käesoleva uurimistöö raames on vaatluse alla võetud 6 Tallinnas asuvat raudbetoonehitist, mis on ehitatud aastatel 2001...2019. Ehitiste valimi koostamisel lähtuti Eesti Betooniühingu poolt hinnatud hoonetest ning valituks osutus 6 hoonet, mis on saanud Eesti Betooniühingu Liidu poolt preemia ja tunnustuse raudbetoonkonstruktsiooniliste lahenduste ja kavanduste eest:

- Büroohoone Toompuiestee 33a, ehitusaasta 2001, eriauhind;
- TTP kontorihoone, ehitusaasta 2005, peaauhind;
- LukuExperti büroohoone, ehitusaasta 2006, peaauhind;
- IT Kolledž, ehitusaasta 2008, eriauhind;
- Eesti Kunstiakadeemia, ehitusaasta 2018, eriauhind;
- Sisekaitseakadeemia, ehitusaasta 2019, peaauhind.

### **3.2 Visuaalse vaatluse läbiviimine**

Visuaalsel vaatlusel hinnati raudbetoonehitiste välisilme seisukorda vastavalt autori poolt koostatud hindamistabelile. Vaatlus viidi läbi kahel erineval perioodil: 2023. aasta detsembris ja 2024. aasta veebruaris.

Visuaalsel vaatlusel jagati konstruktsiooni küljed põhiilmakaarte (põhi, lõuna, ida, lääs) järgi ning vaadeldi igat külge eraldi. Hoonete fassaadiküljed jagati omakorda kolmeks mõtteliseks tsooniks: sokkel, fassaad ja katusejoon. Soklijooneks loeti piirkonda, mis astus tagasi fassaadipinnast või eendus sellest. Fassaadiga ühel tasapinnal olevad soklid võeti maapinnast kuni 1 m kõrgused. Katusejoonena vaadeldi katuseserva alla jäävat 0,5 m kõrgust riba. Fassaadipinnana käsitleti piirkonda sokli ja katusejoone vahel, mis moodustas suurema mahu hoone fassaadist.

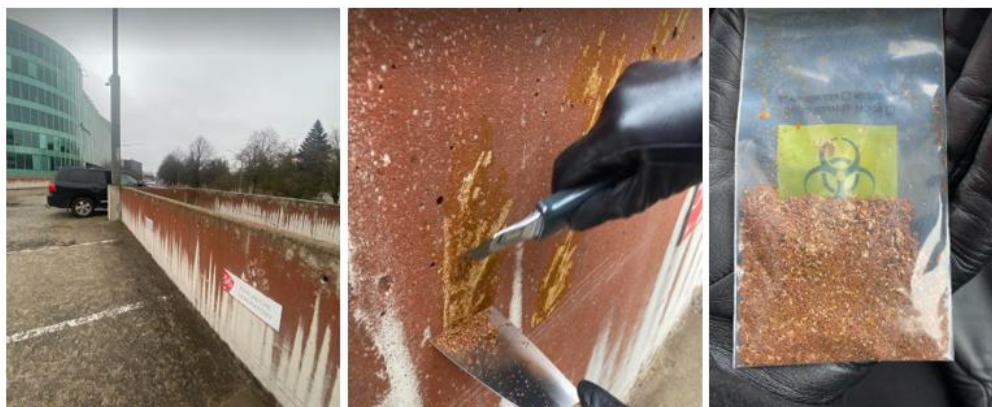
Vaatlused teostati peamiselt maapinnalt defekte pildistades ning neid üles märkides. Võimaluse korral õnnestus kõrgemal oleva fassaadi ja katusejoone vaatluseid teostada ka kõrgematel tasapindadel kui hoone omanik ning konstruktsioonilised lahendused

seda võimaldasid. Kuna kõikide hoonete puhul ei õnnestunud kõrgemal olevaid osasid analüüsida, ei kajastu need ka analüüsis.

Eesmärgiks oli vaatlused läbi viia enamjaolt kuivadel ja päiksepaisteliste päevadel, millele eelnesid vihmased ilmad. Sellisel juhul ilmnevad kahjustused betoonipinnal selgemini ning kahjustuste kaardistamine on tõhusam. Sellegipoolest ei õnnestunud teatud hoonete visuaalse vaatluse läbiviimiseks eelpool kirjeldatud olukorda saavutada.

Mitmetel hoonetel esines punast värvi bioloogilist kasvu, mille uurimiseks teostati proovivõtt Toompuiestee 33a Büroohoone parkimismaja siseküljelt (Joonis 3.1). Uuritavalt pinnalt võeti analüüsitavat materjali kokku kaheksast kohast, mis hõlmasid erinevaid piirkondi ja alasid parkimismaja siseküljel.

Proovivõtt viidi läbi järgmiselt: vertikaalsele betoonpinnale toetati horisontaalselt pahtlilabidas, mille peale koguti noaga pinda kraapides bioloogilist saastet. Selle meetodi eesmärk oli koguda võimalikult täpne ja esinduslik proov, mis võimaldaks seda edasiste analüüside jaoks uurida. Kogutud bioloogiline puru asetati minigripi kotti ning kott suleti hoolikalt, et vältida proovi saastumist. Järgnevalt saadeti kogutud bioloogiline mass Tallinna Tehnikaülikooli laborisse analüüsimiseks, et tuvastada selle olemus ja võimalikud esinemise põhjused.



Joonis 3.1 Bioloogilise saaste kogumine parkimismaja siseküljelt [autori foto]

## 4. TULEMUSTE ANALÜÜS

### 4.1 Büroohoone Toompuiestee 33a

Büroohoone asub Tallinnas kesklinnas Toompuiestee 33a aadressil. Hoone valmimisaasta on 2001 ning konstruktsioonilt on tegemist monoliitse ehitisega.

#### 4.1.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond

Hoone sise- ja välispinnad on viimistlemata puhtad betoonpinnad. Konstruktsiooni avaused astuvad fassaadist sissepoole ligikaudu 10 cm ning paiknevad peamiselt igal põhiilmakaarel. Betoonitööde teostamisel on kasutatud isetiheneva betooni tehnoloogiat, mis võimaldas täpselt valada kolmekihilisi seinapaneele. Hoone on ühendatud parkimismaja ning büroohoone suurema osaga, mis jäid vaatluselt välja.



Joonis 4.1 Toompuiestee 33a [37]

Hoone põhjapoolset soklit ja fassaadi piirab maapinnast ligikaudu 3 m kõrge parkimismaja, mis on hoonega ühendatud. Parkimismaja on kahekorruseline, millest viimane korrus on avatud. Konstruktsiooni lõunasuunas asub läheduses neljakorruseline korterelamu ning üksikud puud, mis tekitavad lõunafassaadil varjulisi alasid. Lõuna- ja läänesuunal asub avatud autoparkla. Lääneküljest liitub konstruktsioon klaasfassaadiga ning sealt edasi jätkub konstruktsiooni osa, mille fassaad on krohvitud. Hoone idakülg asetseb liiklustee kõrval, mida eraldab ligikaudu 2 m laiune jalakäijate tee.

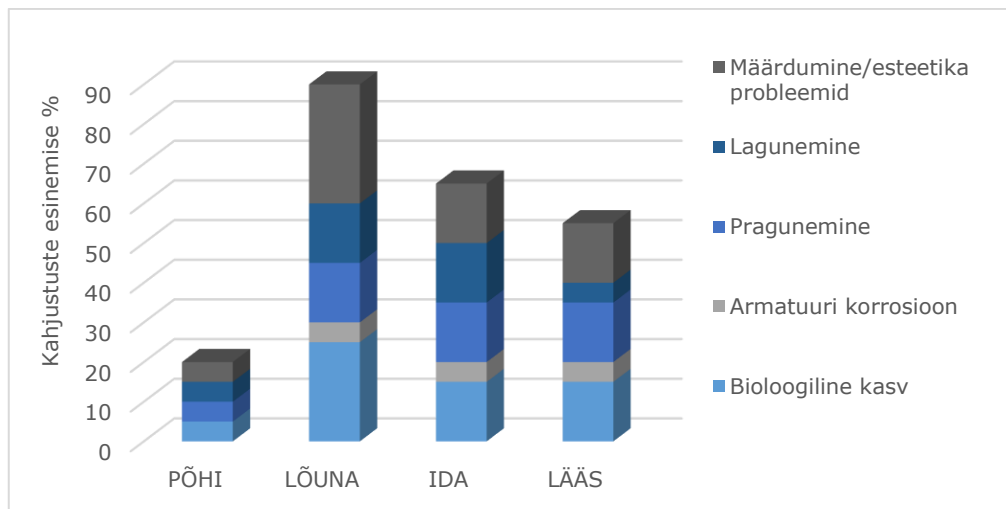
#### 4.1.2 Lagunemisilmingud konstruktsioonil

Toompuiestee Büroohoone valmimisest on möödunud 23 aastat ning kahjustused konstruktsioonil on marginaalsed.



Joonis 4.2 Toompuiestee Büroohoone seisukord aastal 2012 [38] ja aastal 2024 [autori foto]

Visuaalse vaatluse käigus esines hoone lõikes kõige enam määrdumist ja esteetika probleeme (~ 65% fassaadi pinnast) ning bioloogilise kasvu (~ 60%) ja pragunemise ilminguid (~ 50%). Väiksema osatähtsuse moodustasid lagunemine ning armatuuri korrosioon.



Joonis 4.3 Hoone kahjustused kogu fassaadipinna ulatuses

Joonis 4.2 imestab olukorda, kuidas aja möödudes on kahjustused betoonipinnal süvenenud. Piltidelt torkab silma erinevusi katusejoones, nii fassaadi osas kui ka sokli piirkonnas. Piltidelt eristub, et 2012. aasta seisukord katusepiirkonnas oli kordades parem kui seda on tänapäeval. Mustad laigud pinnal viitavad pidevale märgumisele ning bakterite kasvule.



Joonis 4.4 Büroohoone lõunakülj aastal 2012 [38] ja aastal 2024 [autori foto]

Fassaadi osas on peamiseks probleemiks avaused ja nende ümbrused. Fassaadist taanduvad avaused loovad võimalused sadevee kogunemiseks pinnale, mis omakorda toob kaasa pinna lagunemisilmingud.

Soklijoonelt hakkavad silma külma- ja soolakahjustused, mis on peamiselt tingitud mitme talve jooksul hoone soklipiirkonna vahetusse lähedusse kogunenud/ladustatud lumest ja selle sulamisest, mille korral kahjulikud ained ja soolad tungivad betooni sügavamasse kihti.

Hindamaks hoone välispinna kahjustusi põhjalikumalt, vaadeldakse uuringu käigus tekkinud kahjustusi konstruktsiooni osade kaupa täpsemalt.

### **Soklijoon**

Konstruktsiooni soklijoone piirkonnas esinevad probleemid eristuvad üksteisest olenevalt paiknemisest ilmakaarte suhtes. Peamised kahjustused on sammaldumine, soolade ladestumine pinnale ning kulumine ja pragunemine koos tükkide eemaldumisega.

Põhjapoolsel soklijoonel esineb suuremal määral bioloogilist kasvu kui seda on hoone teiste külgede soklipiirkondades. Peamiseks ilminguks on sammaldumine, mille esinemisprotsent on põhjapoolses osas võrreldes soklijoone piirkonnaga ligikaudu 5% (Joonis 4.5). Lõuna-, ida- ja läänesuunal on sammaldumisilmingud minimaalsed.



Joonis 4.5 Soklipiirkonna sammaldumine põhjasuunas [autori foto]

Hoone soklipiirkondades on sageli täheldatav kokkupuude veega ja sellest tulenev märgumine, mis loob soodsad tingimused sammalde kasvamiseks ja paljunemiseks. Lisaks sellele võib hoone läheduses asuv parkimismaja, mis on seotud hoone teise korrusega, pakkuda täiendavat varju ja niiskust, mis soodustab bioloogilist kasvu betooni pinnal. Varjus olevad alad on päikesevalgusele ja tuulele vähem avatud, mis omakorda vähendab betooni kuivamist ja põhjustab niiskuse kogunemist. Parkimismaja katusele või konstruktsioonidele kogunev vesi tilgub soklipiirkonda, tekitades seeläbi sokli piirkonnale pritsmetsooni, mis suurendab veelgi niiskumist ja märgumist põhjapoolsel soklijoonel.

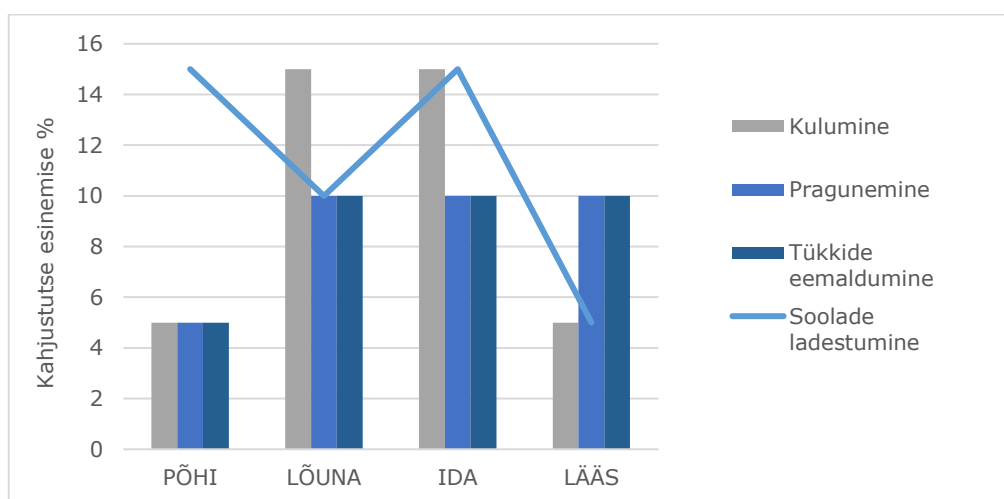
Igal ilmakaarel esines soklipiirkonnas betoonpindadel soolakahjustusi, mis on tingitud peamiselt asjaolust, et hoone asetseb sõidutee vahetus läheduses, intensiivsemalt leidis kahjustusi põhja- ja idaküljel (Joonis 4.6).



Joonis 4.6 Soklipiirkonna soolakahjustused [autori foto]

Talvistel perioodidel kasutatakse teede libedusetõrjeks soola, mis piserdatakse teekatetele. Soolade pritsimisel satuvad piisad ka konstruktsiooni pinnale. Lisaks otse

konstruktsioonile piserdavatele sooladele on veel suurem lagundav toime soolaveel, mis autoteelt või lume sulamisel konstruktsiooni pinda rohkem kahjustavad. Visuaalsel vaatlusel oli selgesti näha lume kogunemist hoone perimeetri ümber. Selline soolade kandumine ja kogunemine betoonpindadele põhjustab mitmeid kahjustusi betooni struktuurile. Soolad reageerivad betooni koostisosadega, tekitades keemilisi reaktsioone, mis tekitavad betoonpinna pragunemist, murenemist ja tükkide eemaldumist, mille tulemusel väheneb ka konstruktsiooni vastupidavus vahelduvale külmumisele-sulamisele (Joonis 4.7).



Joonis 4.7 Pinnakahjustuste esinemine soklipiirkonnas mõjutatult soolade esinemisest

Enim esines kahjustusi ida- ja põhjaküljel, mis on ka eeldatav, kuna just idakülg on soolade poolt kõige enam mõjutatud ning põhjasuunas tekib soolade ladestumine ennekõike piirkonna kohal olevast autoparklast. Lõuna- ja läänesuunal olid kahjustused vähesed. Põhjasuunas on näha, et kulumist, pragunemist ja tükkide eemaldumist pinnalt esines teiste külgedega võrreldes pea poole vähem. Põhjuseks võib olla asjaolu, et põhjakülg on vähem avatud päikesevalgusele ning ka talvistes oludes lumele ja selle ladustamisele betoonpindadele, mis soodustab külmumist-sulamist betoonpinnal.

Alapeatükis 2.4 sai väljatoodud kehtiv Eesti standard *EVS-EN 1992-2:2005+NA:2008*, mille kohaselt tuleb raudbetoonkonstruktsiooni elementide projekteerimisel arvestada vee ja soolade võimaliku penetratsiooniga või liikumisega sõiduteelt konstruktsiooni poole. Arvestada tuleb 6 m horisontaal- ja vertikaalsuunas. Kahjuks ei ole teada rohkem andmeid kasutatud betooni klassi ega ka kaitsekihi osas, seetõttu ei saa kindlalt väita, kas antud hoone projekteerimisel on neid kauguseid arvestatud. Sellegipoolest võib vastavalt visuaalse vaatluse tulemustele järeldada, et hoone puhul ei ole arvestatud

nõuetele vastava kaitsekihi paksusega. Nii lõuna-, ida- kui ka läänesuunas paistsid armatuurvarraste otsad kogu soklijoone perimeetri ulatuses (Joonis 4.8).



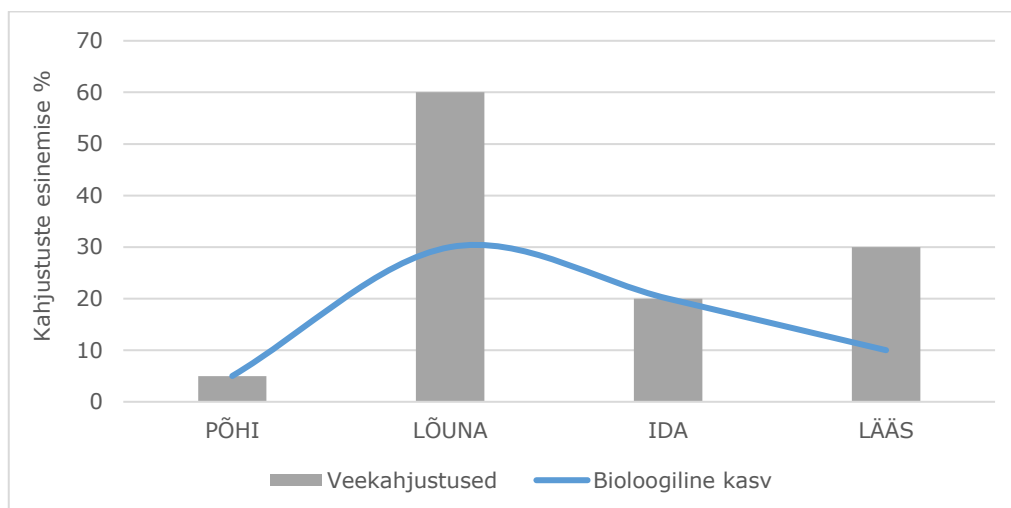
Joonis 4.8 Armatuuri korrosioon lääne ja idaküljel [autori foto]

## Fassaad

Hoone fassaadi osas esines peamiselt pragunemist ja vihmaveest tingitud bioloogilise kasvu probleeme. Pragude esinemine kogu hoone perimeetril oli tugevamalt näha lõuna-, ida- ja lääneküljel. Põhjaküljel märgati pragunemist vähem. Kuna betoonitöödel oli kasutatud isetihenevat betooni, võib see olla peamine põhjus pragunemisilmingute tekkeks. Pragunemist soodustavad päikesekiirgus, pinna vahelduv kuumenemine ja jahtumine ning vihmavee voolav ja pritsiv mõju, mis betooni struktuuri nõrgestavad. Seda ilmestab ka asjaolu, et põhjafassaadil esines pragunemist vähesemal määral.

Fassaadi osas olevad avaused, mis taanduvad fassaadi pinnast, loovad vihmaveele sobiva ladestumispinna. Vaatluse käigus selgus, et vihmavesi koguneb avade pinnale ning voolab mööda fassaadipinda maha (Joonis 4.4). Selline pidev märgumine soodustab bakterite ja hallituse kasvu, mis esines igal küljel, kus avaused paiknesid (lõuna, ida, lääts). Suuremal määral esines kahjustusi just fassaadipindade ülemistes tsoonides. Ülemised piirkonnad taluvad kõige enam vihmavee koormust ning on avatud õhus lendlevatele saasteainetele ning päikesekiirgusele. Tulemustes selgub, et enam veekahjustusi ja sellest tingitud bioloogilise kasvu ja määrdumise ilminguid esines lõunafassaadil. Lääne- ja idaküljel kahjustuste esinemissagedus oli väiksem ning põhjafassaad (põhjafassaadil ei esine avausi) oli kahjustustest kõige vähem mõjutatud (Joonis 4.9).





Joonis 4.9 Veekahjustuste ja bioloogilise kasvu esinemine fassaadi piirkonnas

Fassaadipiirkonna avauste ümber oli märgata ka betooni nii-öelda kärjestruktuuri. Selgelt hakkab silma, et avauste perimeetri ulatuses ei ole isetihenev betoon piisavalt tihenenud ning kivinemisel on moodustunud avade ümber kärjestruktuur (Joonis 4.10). See viitab asjaolule, et avade ümber ei ole moodustunud kaitsekihi paksus piisav võrreldes projekteerituga. Mitme avause kohal paistsid armatuurid, mis olid roostes.



Joonis 4.10 Avauste ümbruste veekahjustused ja armatuuri roostetamine [autori foto]

Kärjeline pind soodustab vee imbumist betooni. Piltidelt hakkab silma, et avauste ümbrused on niisked. Vee ja niiskuse kogunemise esinemist oli märgata ka fassaadipinnal tõmbiavade ümbruses. Avade ümbruses ei ole betoon ilmselt saavutanud piisava tiheduse, mille tõttu pind ka suuremal määral vett endasse imab ning jahedamate ilmade korral külmub ja soojematel taaskord sulab (Joonis 4.11). Taolised kahjustused esinesid fassaadi alumises tsoonis peamiselt lõuna-, ida- ja läänesuunas,

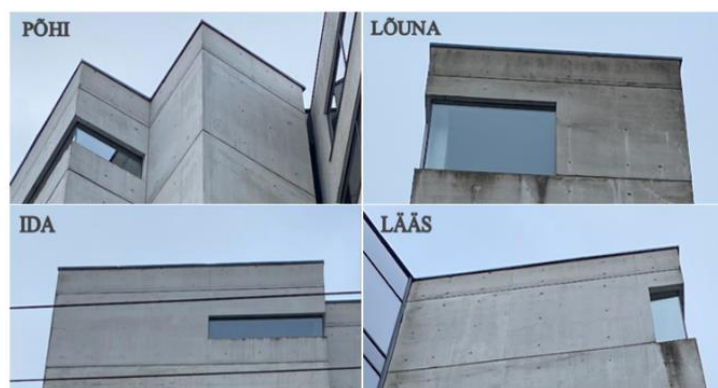
üksikud kahjustused esinesid ka põhjasuunal. Ilmingud just antud tsoonis võivad olla tingitud asjaolust, et kõrgemal asuvatele pindadele langeb suuremal määral päikesekiirgust, mis soodustab vee aurustumist tõmbiaukude ümbrusest, maapinnale lähedamal asuvad osad saavad väiksemas koguses päikese radiatsiooni ja tuulekoormust, mille tõttu ka vee aurustumine on aeglasem.



Joonis 4.11 Tõmbiaukade ümbruste veekahjustused lääne- ja lõunasuunal [autori foto]

### **Katusejoon**

Katusejoone kahjustuste hindamine toimus maapinnalt vaadeldes, mistõttu ei olnud võimalik lähivaatlusena hinnata pinna pragunemist ja teisi kahjustusi. Sellegipoolest märgati katusejoone pinnal peamiselt esteetika probleeme (Joonis 4.12).



Joonis 4.12 Katusejoone seisukord peailmakaarte suhtes [autori foto]

Nii lõuna-, ida- kui ka läänesuunal oli näha pinna muutumist mustaks. Hoone lõunaküljest on katusejoone piirkonnast määrdunud ligikaudu 90% kogu pinnast. Ida- ja lääneküljel on määrdumist märgata vähem ning põhjaküljel on praktiliselt puhas.

Katusejoon saab konstruktiivse lahenduse tõttu vihmavee mõjul kõige enam koormust. Seetõttu püsib pind pidevalt niiske ja märg, luues soodsad tingimused hallituse ning bakterite kasvuks ja paljunemiseks, mis omakorda muudab betoonipinna mustaks. Lisaks hallitusele ja bakteritele on antud piirkond väga altis ka tahkete õhusaastete ladestumisele. Niiskele pinnale kleepuvad õhusaaste osakesed ning kuna hoone asub südalinnas, leidub antud piirkonnas ka hulgaliselt õhusaastet. UV-kiirgus ja Eestis valdavad lääne- ja edelatuuled soodustavad eelmainitute tegurite teket.

### **4.1.3 Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele**

Soklijoone arhitektuurne lahendus soodustab piirkonnas vahelduvat märgumist-kuivamist ning märgumist-külmumist, tekitades pinnale külmakahjustusi. Võimalikuks saab pidev vee voolamine mööda pinda ning selle kogunemine soklijoone äärtesse. Soklijoone piirkonda võib pidada pritsmetsooniks nii vihmavee kui ka sõidutee vahetuslähedusest lekkivatest lumesula pritsmetest, millest viimase korral saavad toimuda soolakahjustused betoonis. Vee voolamine mööda pinda soodustab bioloogilist saastumist ning muudab betoonpinnad tumedaks. Selline olukord soodustab bioloogilise saastumise levikut ja betoonpindade tumenemist. Kriitiliseks ilminguks nii arhitektuurse kui ka ehitustehnoloogilise lahenduse puhul osutus armatuuri roostetamine. Puudub täpne teave selle kohta, milline armatuuri kaitsekiht oli sellesse piirkonda projekteeritud ja kas betoonitöödel võeti seda arvesse. Ehitustehnoloogiliste lahenduste puudused hõlmasid betoonisegu ebapiisavat tihendamist ning pinna ebaühtlust ja karedust, mis soodustas vee absorptsiooni ja vähendas betooni tugevust ning külmakindlust, mille tulemusel toimus piirkondades kulumine ja tükkide eemaldumine.

Büroohoone fassaadiosas arhitektuursed lahendused, nagu avade paigutus, mõjutavad otseselt hoone veetõrje omadusi ning loovad tingimused vee kogunemiseks ja voolamiseks, mis omakorda soodustab niiskuse imbumist struktuuridesse ja bioloogilise saastumise levikut. Näiteks avade asukoht ja paiknemine suunavad vihmavee otse fassaadile, tekitades seal vee pidevat voolamist ja pinna märgumist. Samuti osutuvad määravaks ehitustehnoloogilised aspektid, nagu betooni valik ja betoonisegu töötlemine. Ebaõige betoonisegu valik ja selle käsitlemine põhjustavad pragusid ja kärjestruktuuri hoone servades ja avade ümbruses, eriti piirkondades, kus on suur päikesekiirguse ja temperatuuri kõikumise mõju. Betooni tiheduse ja kaitsekihi paksuse ebapiisavus viib niiskuskahjustuste ja rooste tekkeni avade ümbrustes ning seeläbi mõjutab hoone pikaajalist stabiilsust ja terviklikkust. Lisaks konstruktsiooniavadele on

olulised ka montaažiavad, millest antud hoone puhul olid enim kahjustustest mõjutatud tõmbiavad. Nende ümbrustesse imendus rohkem vett ning temperatuurikõikumistel toimuvad pidevad külmumis- ja sulamistsüklid, mis on peamiselt tingitud betoonisegu vähesest tihedusest montaažiavade ümbruses.

Katusejoone pinnal esinevad peamised kahjustused väljenduvad esteetilistes probleemides, milleks on pinna tumenemine ja määrdumine. Selle peamiseks põhjuseks on konstruktiivne lahendus, mis suurendab vihmavee mõju ja koormust katusejoonele, eriti lõuna- ja idasuunal. Selle tulemusel püsib pind pidevalt niiske ja soodustab bioloogilist saastumist ning tahkete õhusaasteainete kogunemist, mis muudab betoonpinna mustaks.

## **4.2 TTP Kontorihoone**

TTP kontorihoone asub Tallinnas Pirital Mähe teel. Hoone valmimisaasta on 2005.

Eesti Betooniühingu Liidu tollane juht nendib, et TTP Büroohoone näol on tegu ühe viimaste aegade kaunima betoonehitisega, kus on kasutatud nii valget betooni kui ka isetihenevat betooni, mis erinevale veeimavusvõimele annab hoone fassaadile huvitava ilme. Ehitaja sõnul oli hoone ehitustegevus keeruline ja raske ettevõtmine ning nõudis palju enam kui tavalise töömehe oskus. Isetihenev betoon peab voolama nagu vesi, mis muudab ehitustehniliselt tööd keerukaks. Antud ehitise puhul oli isetiheneva betooni osakaal erakordselt suur, hõlmates ka vahelagesid. Siinkohal tuleb silmas pidada, et Eestis ei oldud varasemalt valget isetihenevat betooni toodetud ega kasutatud. Ehitustööde kvaliteedi osas pretensioone ei tekkinud ning arhitekt tõi esile ehitajate täpse töö, mida käisid uudistamas ka Soome spetsialistid, betoonivalu oli teostatud selliselt, et isegi vuugikohti ei olnud näha. [1]

### 4.2.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond

Konstruktsioonilt on tegemist risttahukakujulise monoliitse valge isetiheneva betoonkonstruktsiooniga. Hoone peasissekäik asub lõunasuunal keskosas. Peasissekäigu ümbruse fassaad on klaasist ning taandub hoonesse, luues hoone katusega peasissekäigu ette varikatuse efekti. Hoone viimasel korrusel paikneb avatud rõdu nii põhja-, lõuna- kui ka idasuunal, mis on katusepinnaga osaliselt kaetud ning mille küljed on avatud (Joonis 4.1).



Joonis 4.13 TTP Kontorihoone Pirital [37]

Hoone lääne- ja idaküljed on arhitektuuriselt lahendatud nii-öelda topelt fassaadiosaga. Fassaadi välimine koorik astub sisemisest ligikaudu 1,5 m eemale, tekitades ruumilise efekti kahe fassaadipinna vahele. Konstruktsiooni põhjaosa keskel endub konstruktsioon põhimahust, rõhutades sellega hoone sisemist fuajee osa, mille servad on betoonist ja põhjapoolne külg klaasist. Hoone fassaadil paiknevad iga põhiilmakaare suhtes aknapinnad, mis fassaadipinnaga on praktiliselt tasapinnaliselt. Hoone katusejoon on kaetud plekiga, mis ulatub fassaadipinnale ligikaudu 5 cm.

TTP Kontorihoone paikneb sõidutee vahetus läheduses nii lõuna-, ida- kui ka läänesuunal. Tuultele täielikult avatud on hoone lõuna-, ida- ja lääneosa. Hoone põhjakülge varjab lähedalasuv roheala koos puudega. Hoone lõunasuunas asetseb mõne meetri kaugusel avatud autoparkla. Läänepool asetseb auto laadimisala.

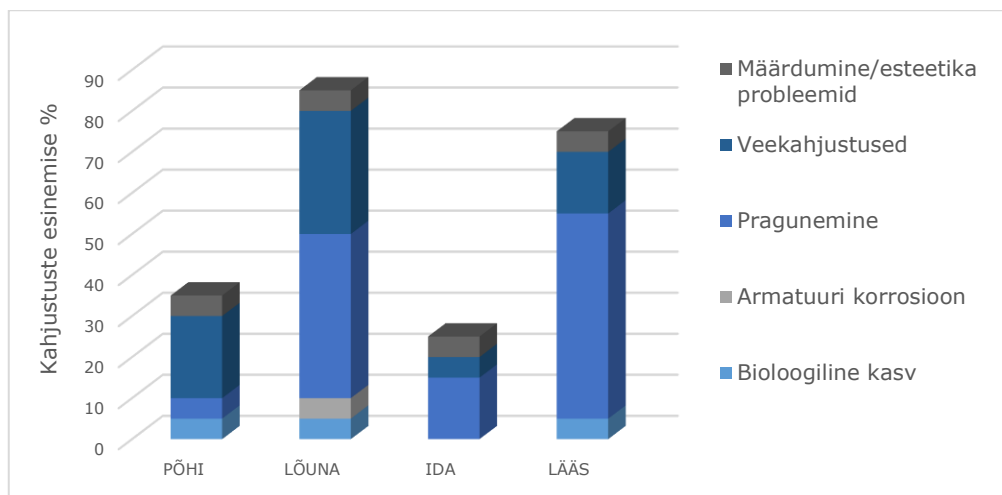
### 4.2.2 Konstruktsiooni lagunemisilmingud

Hoone valmimisest on tänaseks möödas ligikaudu 19 aastat. Peamiseks murettekitavaks probleemiks on konstruktsioonipinnal esinev pragunemine, mis toimub suuremal määral päikesele avatud pindadel.



Joonis 4.14 TTP Kontorihoone lõunakülg aastal 2005 ja 2024 [1], [autori foto]

Hoone lõunakülg oli lagunemisilmingutest mõjutatud ligi 80% kogu pinnast, läänekülg 70%, põhjakülg ligikaudu 30% ning idakülg ligikaudu 20% (Joonis 4.15). TTP Kontorihoone puhul esines kahjustustest enim pragunemist ja veekahjustusi.



Joonis 4.15 TTP Kontorihoone kahjustused kogu fassaadipinna ulatuses

Hoone lõuna- ja lääneküljel täheldati pragunemist vastavalt 40% ja 50% kogu betoonpinnast, kõige vähem ehk 5% ulatuses oli pragunemisilminguid hoone põhjaküljel.

Bioloogilist kasvu märgati lääne-, lõuna- ja põhjaküljel alla 5% peamiselt rõdu läheduses fassaadipinnal. Intensiivsemalt oli kasvu märgata lääne- ja põhjaküljel varjulises ja niiskes piirkonnas. Hoone idaküljel bioloogilist kasvu ei täheldatud.

### Soklijoon

Hoone soklijoonel esines lõunasuunal veekahjustusi enim lääne- ja idaküljel nii topelt fassaadiosa sisemises kui ka välises osas. Hoone lääneküljel peamiselt pragude ümbruses ja idaküljel topelt fassaadiosa sisemisel pinnal (Joonis 4.16).

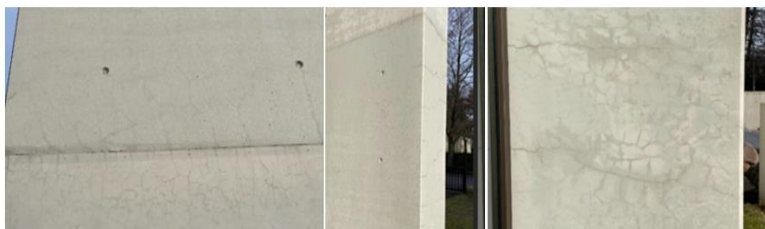


Joonis 4.16 Veekahjustused soklipiirkonnas lääne- ja idaküljel [autori foto]

Määrumise ilminguid oli märgata peamiselt iga peailmakaare suhtes kohtades, kus betoonpinna vahetus läheduses oli haljastus.

### **Fassaad**

TTP Kontorihoonet fassaadipinna peamiseks kahjustusteks olid praod hoone lõuna-, ida- ja läänepoolsetel küljedel. Enim kahjustusi leidis hoone lõuna- ja läänepoolsetel küljedel, ida- ja põhjapoolsetel küljedel oli pragunemise osakaal mitmeid kordi väiksem. Lõuna-, lääne- ja idapoolsetel küljedel leidis suuremal hulgal murenemispragusid nii hoone põhiosas kui ka hoone servades. Põhjapoolsetele küljedele olid tekkinud peamiselt üksikud pikemad praod, mida leidis ka teiste ilmakaarte suhtes.



Joonis 4.17 Pragunemisilmingud lääne-, ida- ja lõunapoolsetel küljedel [autori foto]

Murenemispragunemist esines märkimisväärselt vähem piirkondades, mis olid temperatuuride kõikumistest vähesemal määral mõjutatud, näiteks topelt fassaadi osas sisemistel pindadel, peaukse ees katuse alla jäävas piirkonnas ning ulatuse erinevust oli märgata ka soklijoone piirkonnas. Hoone lõunapoolsetel küljedel kõrgeima valujärgu pinnal, mis jääb rõdu alla, oli märgata suuremate pragude teket (Joonis 4.18).



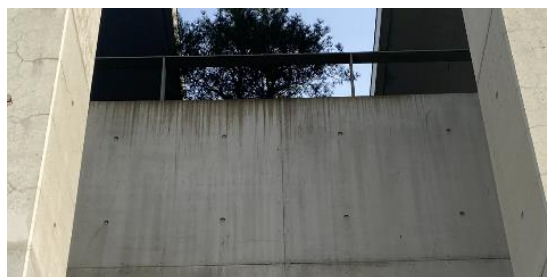
Joonis 4.18 Pragunemine lõunaküljel fassaadi ülaosas [autori foto]

Kuna teistes piirkondades ei ilmnenud sarnast pragunemist, võib eeldada, et antud piirkonnas võis esineda puudulikku tihenemist betooni valamise ajal või võis tekkida mõni muu viga, mis soodustas pragude teket. See võib hõlmata mitmeid võimalikke tegureid, sealhulgas halba segu koostist, valet valutehnikat, ebapiisavat vibratsiooni või ebapiisavat järelhooldust.

Esinemisilmingute ulatusest võib järeldada, et piirkondades, kus betoonpind on mõjutatud otseselt UV-kiirgusest ning temperatuurimuutustest, tekib rohkem pragusid isetihenevale valgele betoonpinnale.

Erinevate valujärgude vuugikohad imavad endasse rohkem vett kui piirkonnad, kus vuuke ei ole. Betoon pole piisavat tihedust antud piirkonnas saavutanud ning seetõttu on materjal poorem ja absorbeerib rohkem vihmavett ja niiskust endasse. Absorbeerumist võib leida ka pragude ümbrusest ning põhjafassaadil tõmbiavade ümbruses. Sarnaseid ilminguid leidis kogu hoone fassaadipinna ulatuses.

Bioloogilist kasvu esines fassaadiosas kohtades, kus sai võimalikuks seisva vee tekkimine ning seejärel vee voolamine mööda fassaadipinda. Rohevetikat leidis rõdu külgedel ning läänekülje avause horisontaalpinna läheduses. Eelmainitud piirkondades muutusid betoonpinnad vihmavee voolamisest triibuliseks, mille ilminguid märgati tugevamalt ka hoone põhjakülje eenduva fuajee külgmistel betoonpindadel ning aknaavade all.



Joonis 4.19 Vee voolamine ja bioloogiline kasv [autori foto]



Intensiivsemalt esines bioloogilist kasvu hoone läänekülje topelt fassaadiosa sisepinnal. Hoone läänekülje välise fassaadiosa sisepinnal ning põhjaküljel rõdu läheduses leidis vähesel määral punavetikat (Joonis 4.19).

### **Katusejoon**

Hoone katusejoone piirkonna vaatlus ja kahjustuste kaardistamine toimus maapinnalt, mistõttu täielikku ülevaadet katusepiirkonna seisukorrast teostatud vaatluse käigus ei saa anda. Peamisteks kahjustustest, mis visuaalselt maapinnalt nähtavad olid, on pragunemine katuse servades ning vihmavee kahjustused. Orienteeritud pragude esinemist servades oli märgata peamiselt hoone lõuna- ja põhjaküljel katuse servades (Joonis 4.20).



Joonis 4.20 Katuseserva pragunemine [autori foto]

Katuse piirkonnas on märgata ka vihmaveekahjustusi, mille tulemusel pind muutub triibuliseks ning tekivad tumedamad ja heledamad ilmingud betoonipinnal, mida oli selgemalt näha hoone lõunapoolsel küljel. Vihmavesi põhjustab betoonpinnal niiskuse ja saasteainete ebaühtlast jaotumist ning sellest tulenevalt erinevate varjundite avaldumist. Ilmingud lõunapoolsel küljel olid märgatavamad, kuna valgus langes vaatluse hetkel antud ilmakaare suhtes kõige paremini pinnale. Põhjasuunas oli märgumist näha rohkemal määral eenduva fuajeosa servades.

Avatud katusepinna sisepinnal oli mõnes kohas täheldatav betooni pinnalt tükide eemaldumist, mille tagajärg oli armatuuri rooste betoonis. Kuna vaatluse hetkel ei olnud võimalik nendele piirkondadele lähemalt ligi pääseda, ei saa täpselt kindlaks teha, kas tükide eemaldumise põhjuseks on ebapiisav armatuuri kaitsekiht betoonis või mõni muu tegur.

### **4.2.3 Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele**

Hoone soklijoone piirkonnas soodustas märgumist peamiselt hoone arhitektuurne lahendus topelt fassaadipinnaga hoone otstes. Sisemistel fassaadipindadel tekib pidev niiske tsoon, kuna need on päikese ja tuulte eest kaitstud, mis omakorda raskendab konstruktsioonipinna väljakuivamist. Sokliosa, mis toetub maapinnale, ning selle ümber olev haljastus tekitavad koos märgumisega soklipiirkonnale tumedamaid laike, mis mõjutavad peamiselt hoone esteetilist välimust, kuid ei soodusta bioloogilist saastumist. Märgumist esines intensiivsemalt sokliosa sadevee sülitite ümbruses, eriti pealmise horisontaalse pinna läheduses, kus sademete korral tekib pritsmetsoon. See võimaldab märgumist peamiselt ehitustehnoloogiliste lahenduste puudumise tõttu. Soklipiirkonna pragunemisilmingute tekke ning nende omakorda märgumise peamiseks põhjuseks on arvatavasti betoonitehnoloogia, mille tõttu esines kahjustusi ka hoone fassaadi ja katusejoone piirkonnas.

TTP Kontorihooone fassaadipiirkonnas täheldati laialdast betoonpinna pragunemist, mis osutus üheks peamiseks probleemiks. See võib tuleneda betoonitehnoloogilise lahenduse valikust, milleks oli isetiheneva betooni tehnoloogia. Selline betoon, olles avatud märgumisele ja temperatuurimuutustele, kipub sageli pragunema. Pragunemist esines eriti intensiivselt fassaadipinna konkreetse valujärgu puhul, mis viitab võimalikele põhjustele, nagu ebapiisav segu koostis, vale valutehnika, ebapiisav vibratsioon või puudulik järelhooldus. Ehitustehnoloogilisest vaatepunktist vaadeldes ei olnud kogu hoone ulatuses ühtki deformatsioonivuuki, mis eeldatavasti tekitas samuti pragunemist. Pragunenud pindadel niiskuse tase suureneb, mis omakorda nõrgestab betoonstruktuuri. Märgumisilminguid täheldati ka fassaadipinnal montaažiavade ümbruses, hõlmates nii tõmbiavasid kui ka valuvuuke, kus betoon ei olnud täielikku tihedust saavutanud. Bioloogilise saastumise peamiseks põhjuseks fassaadipiirkonnas osutus konstruktiivne lahendus hoone rõduosas, kus vertikaalsed pinnad jäeti katmata. See soodustas vihmavee kogunemist ja mööda betoonpinda allavoolamist. Arhitektuuriliselt lisasid topelt fassaadiosa eenduvad pinnad varju, hoides pindu pidevalt niiskena.

Katusejoone piirkonnas paistvad pragunemisilmingud ja tükide eemaldumine annavad märku võimalikest puudustest nii projekteerimise kui ka ehitustehnoloogiliste lahenduste osas. Selliste defektide tulemusel sai võimalikuks armatuuri roostetamist üksikutes kohtades. Vihmaveekahjustuste esinemine on peamiselt tingitud

konstruktiivsete lahenduste puudulikkusest. Katusejoone parapetiplekk on liiga lühike ja puudub piisav veenina, mis suunaks vihmavee konstruktsioonist eemale.

### 4.3 LukuEkspert Büroohoone

LukuEksperti Büroohoone asub Tallinnas kesklinnas Tartu maantee läheduses. Hoone valmimisaasta on 2006 ning montaažitöid teostati talvisel perioodil.

Hoone arhitekti nendib Eesti Betooniühingu artiklis, et betoonisegu tootmisel katsetati mitut erinevat varianti ning lõpuks osutus valituks betoonisegu, mille tsemendi kogusest 40% moodustab valge tsement. Hoone valmise järel tekkis nii arhitektile kui ka hoone omanikule üllatav moment, kus esialgu ühtne heledapoolne pind muutus vihma ja lumiste olude korral kirjuks. Omanikku see ei häirinud vaid pakkus just positiivset üllatusmomenti. [1]

#### 4.3.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond

Konstruktsioonilt on tegemist kuubiku kujulise monteeritud betoonelementidest hoonega (paneelide liitumisvuugid täidetud mastiksiga), mille betoonisegu koosneb 40% valgest tsemendist. Fassaadi pinda sekundeerivad puitdetailid ning klaasist avaused, mis paiknevad hoone iga põhiilmakaare suhtes (idaküljel avaused kaetud vasest plaatidega). Hoone avaused astuvad fassaadipinnast ligikaudu 5 cm sissepoole, avause alumine äär on kaetud plekiga. Põhja- ja idaküljel



Joonis 4.21 LukuEkspert Büroohoone [37]

olevaid ukseavasid katab varikatus, mis on ühendatud konstruktsiooniga. Hoone lääneküljel asetseb fassaadil külgnev terastrepikoda. Katusejoon on kaetud perimeetri ulatuses plekiga, mis ulatub fassaadipinnale ligikaudu 10 cm ning mille servadesse on painutatud veenina.

Hoone põhjakülg asub Tartu maanteest ligikaudu 8 m kaugusel ning on avatud tuultele. Põhjapoolse küljel asub ka avatud väike parkla, mis on hoonest ligikaudu 2 m kaugusel. Idaküljel paikneb kõrvalhoone vahetus läheduses, hooneid eraldab ligikaud 3 m lai käigutee. Idaküljel asuv kõrvalhoone tekitab hoone idasuunal ja osaliselt ka lõuna- ning

põhjafassaadile varjulisi alasid. Idaküljel ühtib hoone fassaadiga ligi 1,5 m kõrgune värav, mille kaudu pääseb hoone sisehoovis. Hoone lõunakülge asub sisehoovis, mille lähedal on parkla. Lõunakülje fassaadi lähedusse on paigaldatud ligikaudu 3 m lai ja 2 m kõrge abihoone. Hoone lääneküljel asuvad üksikud puud ja põõsad.

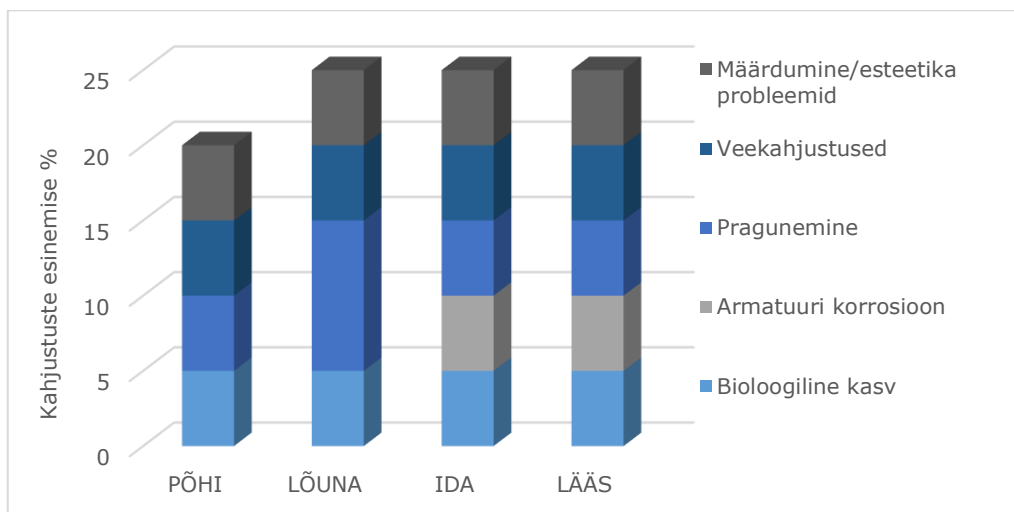
### 4.3.2 Konstruktsiooni lagunemisilmingud

LukuEksperti hoone valmimisest on tänaseks möödas 18 aastat. Peamised kahjustused, mis betoonpinnal esinesid olid veekahjustused ning sellest tingitud bioloogilise kasvu ilmingud akende ja montaaživuukide ümbruses. Kahjustustest märgati ka armatuuri roostetamist paneelide servades, betooni murenemist ja pragunemist ning fassaadidetailide kinnitustest tekkivat määrdumist.



Joonis 4.22 LukuEkspert Büroohoone põhjakülge aastal 2006 ja 2024 [1], [autori foto]

Nii lõuna-, ida- kui ka läänesuunal esines kahjustusi alla 25% kogu hoone fassaadipinnast. Vähesemal määral esineb kahjustusi põhjaküljel (Joonis 4.23).



Joonis 4.23 LukuEkspert Büroohoone kahjustused kogu fassaadipinna ulatuses

## Soklijoon

Hoone soklijoone peamiseks probleemiks perimeetri ulatuses on veekahjustused. Kahjustusi esines igas põhiilmakaares. Hoone lõuna- ja põhjapiirkonnas oli kahjustuste esinemise korral märgata ka kollaste laikude esinemist, mis on ennekõike põhjustatud UV-kiirgusest ja saasteainete ladestumisest pinnale. Viimased satuvad konstruktsioonile peamiselt lähedal asuvatest autoparkimisplatsidelt pritsmete ja lume kaudu.



Joonis 4.24 Soklijoone kahjustused peailmakaarte suhtes [autori foto]

Soklijoone piirkonnas on märgata ka betoonikihi murenemist, seda peamiselt lõuna- ja põhjasuunas, mida võib seletada antud suundades paiknevate autoparklate ning sealt tulenevate vee, lume ja soolade koosmõjust (Joonis 4.24).

## Fassaad

Fassaadipiirkonnas antud hoone puhul üheks valdavaks kahjustuseks on bioloogiline kasv nii avauste nurkades ja alumistes servades kui ka paneelide montaaživuukide ümbruses, hoone nurkades ning fassaadidetailide läheduses, mis on peamiselt tingitud mööda fassaadipinda alla voolavast vihmaveest ning varjulisest piirkonnast (Joonis 4.25).



Joonis 4.25 Bioloogilise kasvu ilmingud fassaadipiirkonnas [autori foto]

Fassaadipinnal esineb rohkem bioloogilist kasvu, sealhulgas hallitust ja baktereid, idakülje kesk- ja alaosas, kus lähedal asuv hoone loob varjulise ala. Teisisõnu, see ala on vähem päikesevalgusele avatud ning seetõttu soodustab niiskuse ja varju kombinatsioon bioloogilise kasvu teket. Lääne- ja põhjasuunalisel fassaadipinnal on bioloogiline kasv veidi väiksem. Lõunasuunal, kus päikese UV-kiirgus on kõige intensiivsem, on bioloogiline kasv veelgi väiksem, moodustades alla 5% kogupinnast. Sammaldumist leidub ukseava ülemise serva vahetusläheduses ning fassaadikinnituste all. See viitab sellele, et päikesevalguse olemasolu vähendab bioloogilise kasvu teket fassaadipinnal, eriti lõunasuunas, kus UV-kiirgus on päeva jooksul kõige intensiivsem.

Paneelide servades esines armatuuri korrosiooni ida- ja läänesuunas. Peamiselt olid armatuuri otsad väljas mõlemal suunal kogu hoone kõrguse ulatuses. Sellest võib järeldada, et armatuuri kaitsekiht paneelikoorigu servades ei ole tagatud (Joonis 4.26).



Joonis 4.26 Armatuuri kaitsekihi puudumine paneeli koorikukihil [autori foto]

## **Katusejoon**

LukuEksperdi büroohoone katusejoonel esinesid peamiselt vihmavee kahjustused välivalgustuse kinnitite läheduses. Teisi kahjustusi vaatluse käigus ei täheldatud.

### **4.3.3 Kokkuvõte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele**

Soklipiirkonna kahjustused tulenevad peamiselt veekahjustustest, mis on tingitud hoone arhitektuurilisest ning ehitustehnoloogilisest lahendusest. Selle tulemusena suunatakse vihmavesi pinnale, kus see koguneb sokli servadesse, tekitades seisva vee ja pritsmete tsooni. Ultraviolettkiirguse ja ümbritseva keskkonna mõjude kaasamisest kannatab pinna esteetiline välimus ning struktuuriline tugevus halveneb. Lisaks ei ole piirkonna hooldus piisav, mis võimaldab lume kuhjumist sokli betoonipinnale ning autoparklate soolavee imendumist betooni, mis omakorda nõrgestab selle struktuuri.

Fassaadi piirkonnas ehitustehnoloogilised puudused, nagu vuukide vormistamine, tekitavad vee kogunemist, märgumist ning biokorrosiooni. Fassaadidetailide kinnitusmeetodid loovad veekogunemise kohti, mille liigsel ladestumisel hakkab vesi voolama mööda betoonpinda, mis omakorda põhjustab esteetilisi kahjustusi, sealhulgas värvimuutusi ja bioloogilist saastumist pinnal. Lisaks on märgatud armatuuri korrosiooni paneelide servades, mis tuleneb tootmistehnoloogilistest puudustest tagamata armatuuri kaitsekihti paneelikoorigu servades. Tootmistehnoloogiliste puuduste tulemusena esineb avade piirkondades kärjelisi pindu, mis imavad vett ja niiskust ning loovad soodsa keskkonna bioloogiliseks saastumiseks.

Hoone katusejoone piirkonnas ehitustehnoloogiliste lahenduste tõttu tekkinud vihmaveekahjustused, mille peamised ilmingud muudavad hoone esteetilist ilmet välivalgustite paiknemise ümbruses, luues kasvukeskkonna bioloogilistele ilmingutele ning õhusaaste ladestumisele. Hoone katusejoone perimeetrile paigaldatud parapeti plekk koos veeninaga tagavad katusejoone küllaldase kaitse väliskeskkonna kahjustuste eest.

## **4.4 IT Kolledž**

Tallinna Tehnikaülikooli IT Kolledž asub Tallinnas Mustamäel Raja 4c aadressil. Hoone valmimisaasta on 2008.

Eesti Betooniühingu Liidu artiklist leiab, et nii hoone omanik, arhitekt kui ka Aasta Betonehitise konkursi žürii liikmed on ühel meelel selle osas, et IT Kolledži betoonitööd ei vasta oodatud kvaliteedistandarditele. Žürii liikmed rõhutavad, et hoonele ei omistatud konkursil peapreemiat just ehitustööde madala kvaliteedi tõttu, kvaliteediprobleemid esinesid nii hoone sisemistel kui ka välimistel betoonpindadel. [1]

#### 4.4.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond

IT Kolledž on monoliitne raudbetoon karkass hoone, mille põhimaht ehk vundament, postid, vahelaed, talad, trepid ja osaliselt välisseinad koosnevad monoliitraudbetoonist.

Oma kujult on hoone mitmetahuline, fassaadipindasid on ilmestatud mitme erineva ehitusmaterjaliga. Hoone lõunasuunas asub peasissekäik, mida katab ligikaudu 2 m eenduv fassaadipind. Puhast betoonpinda lõunasuunal leidub peasissekäigu fassaadipinnal, postidel ning lääneküljel asuval betoontrepitornil. Lääneküljel asuv betoontrepitorn on külgedega avatud lõuna- ja põhjasuunale, trepitorn on ühendatud peahoonega, mille vahelist koridori katab klaasist fassaad.



Joonis 4.27 IT Kolledž Raja 4c [37]

Lääneküljele on trepitorni fassaadi osa avatud. Hoone lääneküljel jäi vaatluse alla ka fassaadipind, mida varjavad eenduvad vasest fassaadiplaadid ning osa katusejoonest. Hoone põhjaküljel esines betoonpinda kuni katusejooneni. Idasuunas on betoonfassaad ühendatud klaasfassaadiga, betoonpinnad on enamjaolt avatud ning paiknevad idasuunas eritahuliselt, tekitades mitmetes kohtades varjulisi piirkondi. Konstruktsiooni betoonpindade katusejoon on kaetud plekiga, mis ulatub ligikaudu 5 cm fassaadipinnale.

IT Kolledži lõunasuuna läheduses asub ligikaudu 5 m kaugusel sõidutee. Lõunasuuna ees asub ka avatud parkimisplats, mis ümbritseb läänesuunal asuvat trepitorni põhja-, lõuna- ja läänesuunal. Hoone läänekülg on osaliselt varjatud lähedal asuvate männipuudega, trepitorn on seevastu täielikult avatud tuultele. Hoone põhjasuunas asub 5-korruseline korterelamu, mis on Kolledžist ligikaudu 8 m kaugusel. Kolledži idasuunal paikneb haljasala ning männipuud, mis varjavad osaliselt fassaadikülge.



Idasuuna läheduses asub ka kolledži katlamaja, mille korstna kõrgus on peahoone kõrgusest mõned meetrid madalam.

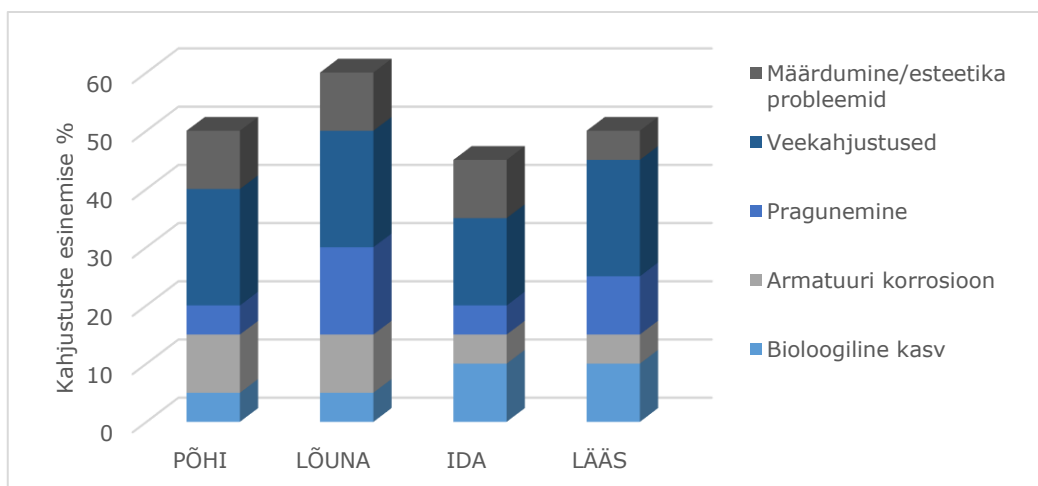
#### 4.4.2 Konstruktsiooni lagunemisilmingud

IT Kolledž on tänaseks keskkonnamõjude käes olnud ligikaudu 16 aastat. Hoone lõikes peamisteks kahjustusteks olid armatuuri korrosiooninähtused, pragunemine ja lagunemine, bioloogiline kasv ning veekahjustused. Kahjustuste esinemissagedus põhiilmakaarte suhtes oli erinev.



Joonis 4.28 IT Kolledži lõunakülg aastal 2008 ja 2023 [1], [autori foto]

Tulemuste põhjal on enim kahjustusi hoone lõunapoolsel küljel. Hoone põhja- ja läänepoolsel küljel esineb kahjustusi kogu betoonipinnast alla 50%. Idaküljel jääb kahjustuste esinemise protsent alla 45%.



Joonis 4.29 IT Kolledži fassaadipinna kahjustused kogu hoone ulatuses

Suuremal määral esines lagunemisilmingud trepitorni piirkonnas. Trepitorni kahjustused arvestati vaatlusel vastavalt asetusele põhiilmakaarte suhtes peahoone kahjustuste mahtu.

Kahjustustest enim täheldati piirkondade lõikes veekahjustusi. Betooni pragunemist leidis rohkem lõunasuunal ning väiksemal määral ida- ja põhjapindadel. Bioloogilist kasvu leidis ligi 10% lääne- ja idasuunas, mis esinesid peamiselt sokli ja katusejoone piirkonnas, trepitorni läänesuunas esines bioloogilist kasvu servade pinnal maapinnast katusejooneni.

### **Soklijoon**

Hoone soklijoone piirkondades esines peamiselt probleeme veekahjustuste ja sammaldumisega. Sammaldumist leidis peamiselt ida-, põhja- ja lääneküljel varjulisematel aladel (Joonis 4.30). Hoone põhjaküljel astub üks fassaadi osa sissepoole, mille ümbruses on sammaldumist märgata rohkem kui seda oli põhjakülje kõrval oleval pinnal. Idasunnas asuval soklijoonel leidis sammaldumist nii maapinna vahetusläheduses kui ka soklijoone kõrgemal piiril valuvuugi kohal, suuremal määral esinesid ilminguid männipuude kasvupiirkonna läheduses. Läänesuunal toimus sammaldumine peamiselt soklijoone alumises tsoonis varjulises piirkonnas.



Joonis 4.30 Sammaldumine soklijoone piirkonnas [autori foto]

Eelneval fotol on märgata piirkondades ka veekahjustusi. Kahjustusi esines soklipiirkonnas iga ilmakaare suhtes, tugevamaid kahjustusi peamiselt põhja- ja idaküljel, mis on suuremal määral avatud lume- ja vihmakoormusele (Joonis 4.31). Piirkondades, mis vihmavett ja lumekoormust suuremal määral ei esines, olid kahjustused minimaalsed.



Joonis 4.31 Soklijoone veekahjustused põhja- ja idasuunas [autori foto]

## Fassaad

Konstruksiooni fassaadipiirkonnal eristusid tugevalt külmakahjustused hoone lääne- ja põhjaküljel. Läänekülje kahjustused asetsesid peamiselt tõmbiavade ümbruses, valuvuukide kohal ning pragude vahetusläheduses, moodustades ringjaid ja ovaalseid kujutisi (Joonis 4.32). Taolised kahjustused paiknesid läänefassaadi varjulises piirkonnas ning vähesemal määral idafassaadi varjulises piirkonnas.



Joonis 4.32 Külmakahjustused fassaadipinna lääneküljel [autori foto]

Armatuuri korrosiooninähtusi fassaadipinnal leidis betoontrepitorni põhja- ja lõunaküljel ning peamiselt ida- ja põhjafassaadil. Leidus ka üksikuid ilminguid lõunafassaadi postidel. Trepitorni külgedel oli korrosioon kiiremini arenenud lõunapool (Joonis 4.33).



Joonis 4.33 Armatuuri korrosioon treptorni lõuna- ja põhjaküljel [autori foto]

Peahoone külgedel väljendusid ilminguid enim ida- ja põhjafassaadi piirkondades (Joonis 4.34). Pindadelt oli näha, kuid killud betoonist eemalduvad ning järk-järgult korrosiooniprotsessi ilmingud muutuvad nähtavaks.



Joonis 4.34 Armatuuri korrosiooninähtused ida-, põhja- ja lõunafassaadil [autori foto]

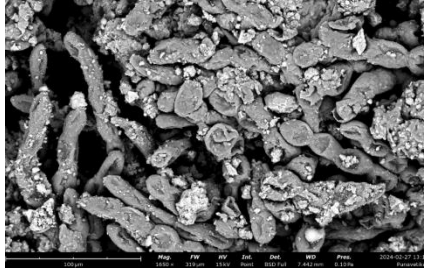
### Katusejoon

Kolledži katusejoone piirkonda õnnestus lähemalt uurida hoone idakülje rõdult. Idakülje katusejoone sisemisel pinnal oli märgata punaka värvusega bioloogilist kasvu. Bioloogilist kasvu esines praktiliselt kogu rõdu idapoolse katusejoone sisemise pinna ulatuses (Joonis 4.35).

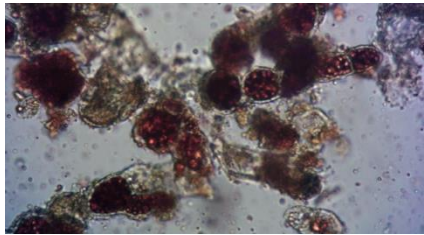
Bioloogilise kasvu täpse olemuse kindlaks tegemiseks teostati proovivõtt Toompuiestee 33a büroohoone parkla sisepinnalt, kus sarnased moodustised esinesid. Kogutud proov saadeti laborisse ning tehti kindlaks, et tegu on niitja *Trentepohlia* perekonnast rohevetikaga (Joonis 4.36). *Trentepohlia* vetika niitjatel rakkudel on intensiivne oranž või punane värvus (Joonis 4.37).



Joonis 4.35 IT Kolledži idakülg [37], [autori foto]



Joonis 4.36 Rohevetikas Trentepohlia perekonnast [39]



Joonis 4.37 Trentepohlia niitjad rakud, skaneeriva elektronmikroskoobi SEM PHENOM XL mikrofoto [39]

Eelmainitud bioloogilise kasvu esinemine nõuab põhjalikumat uurimist ja nende kasvutingimuste väljaselgitamist. See on oluline, et mõista nende levikut ja mõju materjalide struktuuridele. Vetikate uurimine on keeruline ja hõlmab mitmeid aspekte, sealhulgas nende identifitseerimist, leviku jälgimist erinevatel pindadel ja keskkonnatingimuste mõju hindamist, mistõttu tuleks antud teemat käsitleda eraldiseisva uurimistöona.

#### **4.4.3 Kokkuvõtte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele**

Hoone soklijoone piirkondades ilmnenud kahjustused olid peamiselt tingitud arhitektuurilistest lahendustest, mis tekitasid hoonele eri nurki, väljaulatuvaid ja sissepoole nõgusaid osasid ning seeläbi varjulisi ja niiskeid alasid, millel esinevaid kahjustusi soodustas hoonet ümbritsev haljastus. Sellised tingimused soodustasid bioloogilist kasvu, mis omakorda halvendasid hoone esteetilist välimust ning kahjustasid struktuurilist tugevust. Bioloogiline kasv ning intensiivsem märgumine oli märgatav ka montaaživuukide ümbruses, mis viitab betoonisegu ebapiisavale tihenemisele ja ehitustehniliste puudustele. Soklijoone piirkondades esines ka märkimisväärset lumekihti betoonpinnal, mis põhjustas struktuurilisi kahjustusi külmumis- ja sulamistsükli tagajärjel ning viitas hoolduse ebapiisavusele või selle ebaõigele teostamisele.

Fassaadipinnal esinenud armatuuri korrosioon ning struktuurilise tugevuse langus, eriti intensiivsemalt trepitorni lõunaküljel, viitavad mitmetele ehitustehnoloogilistele puudustele. Nende hulka kuuluvad näiteks ebapiisav armatuuri kaitsekiht või selle ebaühtlane paksus ning betoonipinna ebatasasus. Vee intensiivne imendumine ning seejärel märjalt külmumine on seotud ehitustehnoloogiliste aspektidega, eriti betoonisegu tihenemisega, mis on jäänud ebapiisavaks. Betooni ebapiisav täieliku segunemine võib olla tingitud ehitustehnoloogilistest puudustest või ebapiisavast järelhooldusest. Lisaks struktuurilistele probleemidele tekitasid fassaadil ka esteetilisi probleeme erinevate materjalide kasutamine, mille puhul ei arvestatud näiteks vaseplaadi värvi kulumisega pinnale kanduva vihmavee tõttu. Sellised lahendused põhjustavad fassaadipinna esteetilise välimuse halvenemist ja vajavad täiendavat materjalide kooskasutamise läbimõtlemit. Esteetilise välimuse halvenemist tekitasid ka fassaadile kinnitatud detailid, mis võimaldasid vee kogunemist ning selle edasist allavoolamist mööda betooni. Ehitustehnoloogiliselt läbimõeldud lahendused oleksid pidanud sellist olukorda vältima, et tagada fassaadi pikaajaline vastupidavus ja välimuse säilimine. Erikonstruktuurilised lahendused, nagu mitmed eenduvad nurgalised pinnad ja hoone eriosade asetsemine, soodustasid vihmavee ladestumist pinnale ning tekitasid vahelduva märgumise-kuivamise ja märgumise-külmumise tsükleid. Sellised tingimused soodustavad bioloogilist saastumist ja põhjustavad fassaadipinna struktuurilisi ning esteetilisi probleeme.

IT Kolledži katusejoone piirkonnas esinev bioloogiline kasv ja õhusaaste ladestumine on peamiselt tingitud hoone projekteerimisvigadest. Projekteerimisetapis jäeti arvestamata katlamaja paigutuse mõjuga, mis asetati hoone vahetuslähedusse koos kõrge korstnaga. Selline korstna asetus lähedal hoonele võimaldas saasteainetel, mida korstnast eraldub, kanda tuulte mõjul otse hoone konstruktsiooni pinnale. Hoone katusejoone märgumisel muutus piirkond saasteainete ladestumise ning bioloogilise kasvu jaoks soodsaks keskkonnaks. Saasteainete ladestumine pinnale koos niiskusega soodustas mikroorganismide, sammalde, vetikate ja muu bioloogilise kasvu teket ning halvendas hoone välimust ja pindade seisukorda.

## **4.5 Eesti Kunstiakadeemia**

Eesti Kunstiakadeemia hoone asub Tallinnas Kalamaja linnaosas. Hoone valmimisaasta on 2018. Antud uurimustöö seisukohalt jäid vaatluse alla hoone sisehoovi viimistlemata betoonpinnad, mis olid avatud lõunasuunale.

Arhitektuurselt on hoones esindatud esimese Eesti Vabariigi aegsed betoonkonstruktsioonid, nõukogudeaegne tööstushoone monteeritav raudbetoonkarkass künapaneelidest vahelagedega, nõukogudeaegne monteeritav administratiivhoone karkass ja tänapäevane uusehituse osa. [1]

#### 4.5.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond

Sisehoovi pinnad on konstrueeritud monoliitbetoonist. Sisehoov koosneb 5-st korrusest.

Esimene korrus on igakülgselt kaetud.

Sisehoovi teisele korrusele viib lai

betoontrepp, trepi ja teise korruse

põrandad on harjapinnad. Sisehoovi

korrustele on tekitatud tasapinnad

avatud rõdude ja kinniste õpperuumide

näol ligipääsuga hoone seest. Sisehoovi

konstruktsioonis on õpperuumide kohal

kaks avatud rõdu. Kinniseid õpperuume

on kokku 5, paiknedes erikorruste peal

astmeliselt, õpperuumide fassaadiosad on klaasist. Betoonist trepid, postid, talad,

tasapinnad on peamiselt katmata ja avatud väliskeskkonnale. Plekiga on kaetud vaid

õpperuumide ja rõdude talad, ulatudes üle tala ääre ligikaudu 3 cm. Rõdude pinnad on

kaetud puitlaudisega.



Joonis 4.38 Eesti Kunstiakadeemia [37]

Sisehoov on peamiselt kinnine ning tuultest vähe mõjutatud, avatud on vaid hoovi

läänepoolne külg. Konstruktsioonipinna vastas asub hoone teine osa, mis on

vaadeldavast pinnast meetreid kõrgem, jättes vaadeldavad betoonpinnad varju.

#### 4.5.2 Konstruktsiooni lagunemisilmingud

Eesti Kunstiakadeemia hoone puhul toimus kahjustuste ülevaatus hoone sisehoovi

betoonpindadel, mis on peamiselt avatud lõunasuunale. Betoonpinnad on tänaseks

keskkonnamõjudele avatud olnud ligikaudu 6 aastat.



Joonis 4.39 Eesti Kunstiakadeemia sisehoovi fassaadipind aastal 2018 ja 2024 [1], [autori foto]

Kahjustustest esines kõige rohkem bioloogilist kasvu sisehoovi betoontrepil ning talade servades, moodustades kogu avatud betoonpinna mahust ligikaudu 50%.

### Soklijoon

Ülevaatusel sai sisehoovi trepiosa arvestatud soklijoone mahtu. Trepil esines suures mahus bioloogilist kasvu vetikate näol nii trepi nurkades, servades kui ka horisontaalsetel pindadel, intensiivsemalt keskosas. Trepiastmete nurkadesse ja astmete horisontaalsetele pindadele koguneb vihmavesi ning talvistel perioodidel ka lumevesi, tekitades sellega seisva vee olemasolu, mis ilmestab alapeatükis 2.5.1 mainitud. Vee äravoolamist pinnalt takistab ka trepi astmetel olev betooni harjapind.



Joonis 4.40 Vetikate koloniseerimine soklijoone piirkonnas [autori foto]

Joonis 4.40 illustreerib kolmandal ja neljandal fotol intensiivsemat vetikate kasvu, mille peamiseks põhjuseks on arhitektuurne lahendus, mille kohaselt on sadevee äravoolutoru suunatud hoone poole ning on lahendamata jäetud sadevee äravool hoonest eemale. Sadeveetorst tulev vihmavesi valgub otse sisehoovi teise korruse põrandale, mis mööda trepi serva ja nurka astmetele voolab ja koguneb astme nurka.



Vetikate ilmingud olid nähtavad veel ka soklijoone nurgas, mida ilmestab Joonis 4.40 esimene foto.

Konstruksiooni trepil esines betoonpinnalt tükide eraldumist. Suuremal määral eraldus tükke trepiastmetelt, kus toimub vaadeldavatest pindadest enim pinna kulutamist. Kulumist iseloomustab ka Joonis 4.41, kus on näha trepiastmel armatuuri korrosiooni. Tuleb tõdeda, et armatuuri kaitsekiht antud piirkonnas ei ole tagatud. Armatuuri roostetamist esines ka trepi servades.



Joonis 4.41 Armatuuri roostetamine välistrepil [autori foto]

Soklijoone piirkonnas esines betoonpinna määrdumist nii inimtekkelistest protsessidest kui ka sademetest. Pindadelt leiti tumedaid laike, mis viitavad pidevale märgumisele ning sellest tulenevalt veekahjustustele.

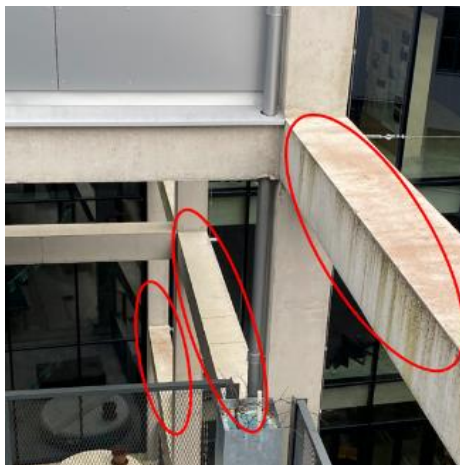
## **Fassaad**

Fassaadi piirkonnas valdavateks kahjustusteks olid bioloogilise kasvu ilmingud nii horisontaalsetel kui ka vertikaalsetel pindadel, mis on kaitsmata ning avatud peamiselt igakülgsele keskkonnamõjudele. Kahjustustest esines suuremal määral vihmavee kahjustusi nii vee voolamisest kui ka selle absorbeerumisest materjali.

Vetikate esinemist leidis peamiselt teise korruse põranda nurkades, kus puudusid ülemistes tasapindades rõdud, mis kaitseksid alumisi pindasid sademetest. Teise korruse põrandal puudub arhitektuurselt lahendust nõudev vihmavee äravool, mille tulemusel sademed kogunevad horisontaalsele pinnale ning mingil hetkel mööda fassaadipinda alla voolavad, tekitades betoonipinnale esteetilisi kahjustusi ning soodustades bioloogilist kasvu.

Vetikate ja bakterite ilminguid leidis ka konstruktsiooni talade külgedel ning horisontaalsetel pindadel. Peamiselt esines rohevetikaid ja baktereid vertikaalsetel

pindadel, millel toimus vee voolamine. Punavetika kolooniaid leidis talade vertikaalsetel osadel, mis olid otseselt avatud väliskeskkonnale. Piirkonnad, mis jäid rõdude alla või olid plekiga kaetud, jäid bioloogilisest kasvust praktiliselt mõjutamata (Joonis 4.42).



Joonis 4.42 Bioloogiline kasv konstruktsiooni taladel [autori foto]

Lisaks bioloogilise kasvu piirkondadele ning seal esinevale pidevale märgumisele leidis veekahjustusi ka piirkondades, kus bioloogilist kasvu otseselt ei olnud. Märgumist oli märgata rohkem konstruktsiooni avauste, postide ja talade servades ja nurkades, mis viitavad, et betoonisegu ei ole antud piirkondades piisavalt tihenenud ning saavutanud struktuurilist täielikkust, mistõttu materjal imeb rohkem niiskust ja vett (Joonis 4.43).



Joonis 4.43 Kärjeline betoonipind avauste ümber [autori foto]

Hoone avauste piirkonnas oli märgata ka tükide eemaldumist nõrgast betoonisegu struktuurist.

## Katusejoon

Hoone katusjoone piirkonnas olid sarnaselt sokli ja fassaadi piirkonnale suuremateks lagunemisilminguteks bioloogiline kasv, vihmavee kahjustused ning õhusaaste ladestumine. Intensiivsemad ilmingud esinesid vetikate ja bakterite näol piki fassaadipinda olevate talade välimistel külgedel ning risti paiknevate talade kummalgi küljel (Joonis 4.44).



Joonis 4.44 Katusejoone bioloogilise kasvu ja õhusaaste ilmingud [autori foto]

Õhusaaste ladestumise ilminguid leidis peamiselt piki fassaadi katusejoone pinda olevate talade pealmistel servadel ning välimistel külgedel. Risti taladel võis samuti pinna mustumist näha, suuremal määral servades. Kuna katusejoone avatud pindu ei olnud võimalik ült uurida, võib järeldada, et sarnaseid ilminguid esineb ka talade pealmistel horisontaalsetel pindadel, tuginedes servades leiduvatele mustjatele moodustistele. See viitab nii õhusaastele kui ka võimalikule bioloogilise kasvule.

### 4.5.3 Kokkuvõtte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele

Sokliosas esinev bioloogiline saastumine on peamiselt tingitud vee kogunemisest horisontaalpindadele, eriti märgatavalt just trepipiirkonna horisontaalsetel osadel. Arhitektuurse lahenduse osas on betoonpinnad jäetud ilma igasuguse viimistluse ja kaitseta, mis tähendab, et vihmavesi ja lumi kipuvad kogunema nendele pindadele. See omakorda aitab kaasa nende pindade pidevale märgumisele ja külmumisele, eriti talvistel perioodidel, kui hoolduse perioodil lumetõrjet ei tehta. Sisehoovi piirkond, olles päikese eest varjatud, takistab pindade kuivamist, mistõttu niiskuse väljakuivamine pindadelt toimub aeglaselt. Ehitustehnoloogilise lahenduse seisukohast on betoonpinnad trepiosas vormistatud harjapinnana, mis soodustab seisva vee kogunemist ning bioloogilist saastumist. Kogunenud seisva vee ja niiskuse mõjul võib tekkida pinna tükkide eemaldumine ja kulumine, mis omakorda põhjustab armatuuri

korrosiooni. Need kahjustused võivad tuleneda mittesobivast betoonisegu valikust, ebapiisavast armatuuri kaitsekihist või ebakorrektselt betoonisegu käitlemisest valamisperioodil. Sellised ehitustehnilised puudused soodustavad pideva külmumise-sulamise tsüklite tagajärjel pinnastruktuuri kahjustusi ja nõrgenemist.

Vastavalt arhitektuurilisele kavandile on hoone fassaadi pinnad enamasti jäetud katmata sarnaselt soklijoonele. Horisontaalsete talade katmata pinnad, kuhu vesi koguneb ja hiljem mööda pinda alla voolab, põhjustavad pidevat niiskumist ja külmumist ning soodustavad bioloogilist saastumist. Bioloogiline saastumine teise korruse põrandapinnal on tingitud sarnaselt trepiosale ehitustehnoloogilistest ning arhitektuursetest lahendustest. Sadevee äravoolusüsteemi lahendus jäeti osaliselt lahendamata, mis on viinud intensiivsema niiskumiseni sadeveetoru läheduses. See omakorda mõjutab bioloogilise kasvu intensiivsust trepi piirkonnas. Betoonpindade kärjelisus hoone avade ja servade ümbruses viitab ebapiisavale betoonitehnoloogiale, mis on põhjustanud poorsetes piirkondades suurema veekogunemise ning pideva niiskumise ja nõrga struktuuri tõttu lagunemise. Hoone ekspluatatsiooni perioodil on betoonpindu kaetud mitmete detailidega, mille ümbruses on soodustatud pindade bioloogiline saastumine ning esteetiliste kahjustuste tekkeid.

Hoone katusejoone piirkonna kahjustuste ilmingud on sarnased fassaadipinna kahjustustega. Katmata pinnad jäävad avatuks sademetele ja ultraviolettkiirgusele, mis põhjustab pindade pidevat niiskumist, külmumist ja kuivamist. Seisev ja voolav vesi loob soodsa keskkonna biokorrosioonile ja õhusaaste ladestumisele, mis kiirendab kahjustuste teket ja mõjutab hoone üldist vastupidavust ning esteetilist väljanägemist.

## **4.6 Sisekaitseakadeemia**

Sisekaitseakadeemia hoone asub Tallinnas Pirita linnaosas ning hoone valmimisaasta on 2019. Antud hoonel vaadeldi peamiselt lõuna- ja põhjasuunal olevaid raudbetoonpindu.

Konstruksiooni omapäraks on kaldse eelpingestatud õõnespaneelide kasutus fassaadil ning graafilise betooniga moodustatud vapi kujutis hoone peasissekäigu kõrval, mille betoonisegu koostises on võrreldes teiste paneelidega kasutatud valget ja halli tsementi.

#### 4.6.1 Hoone konstruktsioon ja seda ümbritsev keskkond

Hoone konstruktsioonis on kasutatud monteeritud eelpingestatud raudbetoonõõnespaneeli, mis hoone põhja- ja lõunafassaadil on asetatud 5...10 kraadiste nurkade alla, moodustades kaldseina efekti. Fassaadil kasutatavad õõnespaneelid on 1,2 m laiused ning kuni 15 m pikkused. Taoline konstruktsioon nõuab erilist täpsust nii elementide mõõtmete kui ka montaažitolerantside osas. Fassaadi ida- ja lääneküljed on põhimahult klaasist.

Hoone koosneb peamiselt 14-st risttahukast, mis on omavahel ühendatud ning üksteise suhtes astmelise paiknevusega.

Arhitektuuriselt on kõik risttahukad erineva suuruse, laiuse ja kõrgusega, tekitades varjulisi alasid hoone fassaadidel. Hoone peasissekäik asub idasuunal, mille kõrval paikneb niideldatav esimene konstruktsiooniplokk. Antud tsooni lõunapoolsel fassaadil on kujutatud graafilise betooniga



Sisekaitseakadeemia vappi, mis Joonis 4.45 Sisekaitseakadeemia Piritall [37] paikneb kuuel õõnespaneeli pinnal. Paneelid on toodetud Soomes ning betoonisegu koostises on kasutatud teatud hulgal valget tsementi.

Konstruktsiooni katus on tehtud samuti monteeritavatest õõnepaneelidest, mis on kaetud. Katusejoone piirkond on kaetud plekiga, mis ulatub fassaadipinnale ligikaudu 15 cm. Plekil puudub veenina.

Vaatluse alla jäid peamiselt põhja- ja lõunasuunal olevad betoonpinnad, mis on mõlemas suunas avatud tuultele. Hoone lõunaküljel on haljasala, millel paiknevad üksikud puud. Hoone põhjasuunal paiknevad põhikäiguteed, autode laadimisplats ning ligikaudu 8 m kaugusel olev sõidutee.

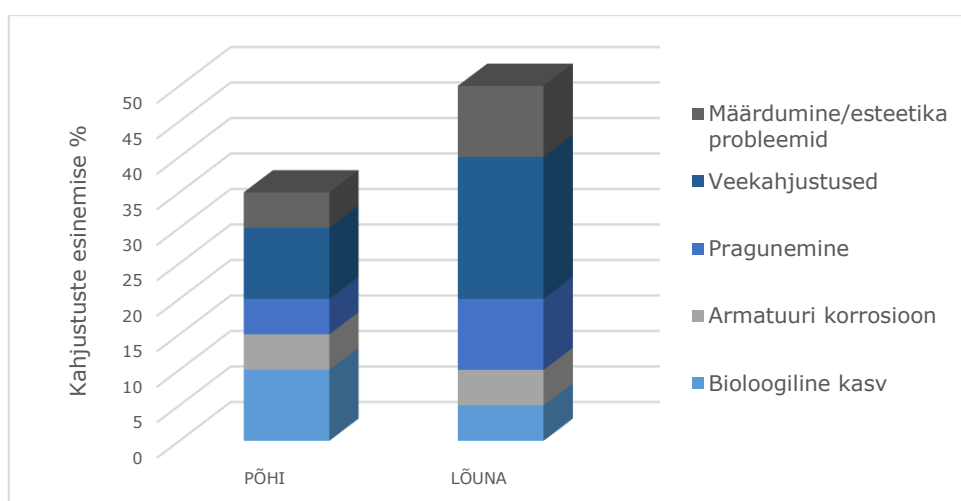
#### 4.6.2 Konstruktsiooni lagunemisilmingud

Antud hoone on väliskeskkonna käes olnud umbes 5 aastat. Võrreldes kahjustuste esinemisprotsenti põhja- ja lõunasuunal, võis juba vaatluse käigus täheldada, et lõunapoolsed betoonpinnad on rohkem kahjustunud.



Joonis 4.46 Sisekaitseakadeemia lõunakülg aastal 2019 ja 2024 [1], [autori foto]

Lõunapoolsete pindade kahjustuste esinemise sagedus kogu pinna ulatuses jääb alla 50%, samas kui põhjapindadel jääb see alla 35% (Joonis 4.47). Hoone lõunaküljel esines suuremal määral veekahjustusi, mida soodustavad arhitektuurse iseärasuse tõttu kaldsed pinnad. Bioloogilist kasvu leidis suuremal ulatuses põhjapoolsetel pindadel, peamiselt soklipiirkonnas ja paneelide vuukides, lõunasuunal kohtades, kus hoone eenduvad osad tekitasid taanduvatele osadele varjulisi alasid.



Joonis 4.47 Sisekaitseakadeemia fassaadipinna kahjustused kogu hoone ulatuses

Võrreldes betoonpindasid lõuna- ja põhjasuunal, hakkas selgelt silma pragunemine ja tükide eemaldumine just lõunapoolsel küljel. Pragunemine toimus peamiselt kogu paneeli ulatuses diagonaalselt või esines murenemispragudena. Põhjapoolsel küljel esines pragunemist ligikaudu poole võrra vähem.

## Soklijoon

Hoone soklijoone piirkonnas esines vetikate kasvu suuremal määral hoone põhjaküljel (Joonis 4.48). Peamiselt maapinna vahetus läheduses ning paneelides olevate õhuavade piirkonnas. Õhuavade pinnale koguneb fassaadipinnalt voolav vihmavesi või talvisel perioodil lumesulamise vesi. Vetika kolooniad esinesid õhuavade sees nii horisontaalpinnal kui ka avade all. Lõunaküljel oli märgata bioloogilist kasvu peamiselt varjulistes piirkondades, kuid sealgi minimaalselt.



Joonis 4.48 Bioloogiline kasv põhjaküljel [autori foto]

Lõunakülje soklipiirkonnas ilmes pragunemist ning osati betoonpindadelt tükide eraldumist. Betoonpinnad, kus esines murenemispragusid, olid selgelt niiskemad ja absorbeerisid rohkem vett võrreldes piirkondadega, kus selliseid pragusid oli vähem või üldse mitte (Joonis 4.49). Väikeste ja suures koguses pragude esinemine soodustab vee kogunemist ja imendumist betooni rohkem, kui seda on üksikute ja suuremate pragude korral.



Joonis 4.49 Murenemispraod lõunaküljel [autori foto]

Alapeatükis 2.8 on kirjeldatud temperatuurimuutuste mõju betoonpinnale ning on väljatoodud, et pideva päikesekiirguse all oleva betooni struktuur nõrgeneb, mureneb ja laguneb, mis kirjeldabki eelpool mainitud. Lisaks sellele võivad betooni pigmendid UV-kiirguse mõjul värvust muuta, mida täheldati ka antud hoone lõunaküljel, kus kohati leidis kollaseid laike betoonil. Põhja- ja põhjaküljadel sarnaseid ilminguid ei esinenud.

## Fassaad

Hoone fassaadipinnal esinesid ringjad moodustised, mis eeldatavasti on pärit juba tootmisest vormipindade õlitamisest. Vormipindu on ilmselt õlitatud õlipõhise tardumisaeglusti õliga, mis võivad olla viskoossemad ja paksemad, põhjustades õhukese kihi ebaühtlast jaotumist vormipinnale. Selle tulemusel võivad tekkida ringjad mustrid või jäägid betooni pinnale. Seega ei kuulu antud ilmingud väliskeskkonnapoolt tekitatud nähtuste või kahjustuste hulka.

Hoone fassaadipinnal esines enim vihmaveekahjustusi, mis paistsid rohkem silma lõunaküljel. Antud hoone arhitektuurne lahendus kaldpindade näol soodustab vihmavee



Joonis 4.50 Vee voolamine mööda pinda [autori foto]

sattumist ja selle voolamist mööda pinda, mida on kirjeldatud eelnevalt ka alapeatükis 2.5.2. Betoonil esinevad peamiselt täies ulatuses veevoolamisest tumedamad ja heledamad jutid, muutes paneelide pinnad triibuliseks. Vee voolamine mööda fassaadipinna paneele

soodustab ka vee sattumist paneeli vuukidesse, kus on märgata bioloogilist kasvu nii lõuna- kui ka põhjakülgedel. Põhjaküljel on ilmingud intensiivsemad, kuna pind on peamiselt varjus ja niiske, mis suurendab bioloogilise kasvu esinemise võimalikkust ja selle intensiivsust.

Pragunemise ja lagunemise ilmingud, millest viimased ilmnesid peamiselt tükkide eraldumisel, esinesid suuremal määral hoone lõunafassaadil. Tükkide eemaldumist põhjafassaadipindadel ei täheldatud. Pragunemisilmingud sarnanesid soklipiirkonnaga, kus enim oli näha murenemispragusid ning üksikutel paneelidel diagonaalsid kulgevaid pragusid. Võrreldes soklipiirkonnaga, olid fassaadil murenemispraod kuivemad, mis on peamiselt tingitud sellest, et soklijoon on pidevalt märg ja väljakuivamine antud piirkonnas aeglasem kui seda on fassaadil. Hoone lõunakülgetel fassaadidel oli mitmes kohas märgata betooni irdumist, mille tulemusel raudbetooni korrodeerus (Joonis 4.51).



Joonis 4.51 Betooni delaminatsioon ja armatuuri korrosioon lõunaküljel [autori foto]



Betoon karboniseerub praktiliselt koheselt, kui ta väliskeskkonda paigutada. Hoone lõunakülgne fassaad on peamiselt kuivem, kui seda on põhjapoolne fassaadiosa, mistõttu karboniseerumine on ka kiirem antud piirkonnas. Päike ja vihm nõrgestavad betoonipinda veelgi ning betooni delaminatsioon on kerge tekkima. Tükkide eraldumise piirkonnas on märgata ka tugevamat märgumist, mis viitab poorsele struktuurile.

### **Katusejoon**

Kahjustuste tuvastamine katusejoonel toimus maapinnalt, mis piiras täieliku ülevaate saamist kogu katusepiirkonnas esinevatest probleemidest. Visuaalsel inspeksioonil ilmnisid selgelt veekahjustused ning pinna tumenemine, mis viitab saasteainete ladestumisele, millest detailsemalt kirjeldati alapeatükis 2.7. Nimetatud peatükis rõhutati, et kuigi saasteainete ladestumine betoonile ei tekita otsest lagunemist, võib see soodustada bioloogilist kasvu. Ilmingud olid märgatavad nii hoone lõuna- kui ka põhjaküljel. Hoone katusejoon on kaetud plekiga, mis ulatub ligikaudu 10 cm fassaadile. Hoone lõunasuunal eristub selgelt, kuidas pleki alla ligikaudu 10 cm fassaadipinda on heledam ning sellest järgnev juba tumedam. Antud pinna värvuse muutumine iseloomustab selgelt parapetipleki tähtsust ja selle ulatuse olulisust fassaadipinnale.

### **4.6.3 Kokkuvõtte hoone üldistest puudustest ja nende mõjust püsivusele**

Arhitektuurne lahendus, õõnespaneelide kaldu asetsemine, soodustab pinnal suuremat veevoolamise efekti, kui seda on rõhtsate pindade puhul. Projekteeritud õhuavad koguvad enda pinnale vett ning põhjustavad seeläbi piirkondades bioloogilist saastumist. Pidev pinna niiskumine ning lõunaküljel intensiivsem kuivamine, tekitavad esteetilisi kahjustusi, mille ilmingud toovad endaga kaasa betooni pigmendimuutuseid. Pragunemine pinnal on tingitud peamiselt vihmaveest ja pidevatest temperatuurimuutustest. Pinna struktuuriline tugevus väheneb erinevate temperatuurimuutuste tõttu pinnal, tuues kaasa pragunemise. Praod omakorda absorbeeruvad intensiivsemalt vett, mis külmumis-sulamistsükli korral tekitavad külmakahjustusi ja struktuurilist nõrgenemist.

Hoone fassaadiosas eristus enim sarnaselt soklijoonele, paneelide kaldpinnalise asetuse tõttu, veevoolu ilmingud, mis tekitasid suuremal määral esteetilisi kahjustusi, muutes paneelide pinnad triibuliseks. Paneelide vuukides soodustas see bioloogilist saastumist. Ehitustehnoloogiliselt on paneelide pinnad kohati pooremad ning imavad rohkem vett endasse, samuti soodustab seda arhitektuurne lahendus, mille tulemusel toimub pinna

märgumine sademete esinemisel. Pidev märgumine ja kuivamine pinnal nõrgestab struktuuri, mille tulemusel on õõnespaneelidel märgata betooni irdumist. Kuna antud paneelide armatuuri kaitsekihi paksuse kohta infot ei õnnestunud saada, võib põhjus seisneda ka ebapiisavas armatuuri kaitsekihi paksuses.

Sarnaselt soklile ja fassaadile sai ka hoone katusejoone kahjustuste peamiseks põhjuseks arhitektuurne lahendus, mis hõlmas kaldpindu. Kaldpinnad soodustasid sademete otsest sattumist pinnale ning selle edasist pikemaajalist kokkupuudet betoonpinnaga.

# KOKKUVÕTE JA SOOVITUSED

## Ehitise ja rajatise orientatsioon ilmakaarte suhtes

Ehitise ja rajatise orientatsioon ilmakaarte suhtes on oluline aspekt, mis kujunes välja ka analüüsi tulemustest. Kahjustused esinesid ilmakaarte lõikes enim lõuna-, ida- ja lääneküljel. Põhjakülje pinnad hoonete lõikes olid kõige paremas seisukorras võrreldes teistel ilmakaartel paiknevate pindadega.

Vaadeldavatest hoonetest esines enim kahjustusi konstruktsioonide lõunakülgedel. Büroohoone 33a hoonel ning TTP Kontorihoonel, kus kahjustuste osakaal betoonpinnal oli vastavalt 90% ja 85% lõunakülje kogupinnast. Kõige vähem oli mõjutatud lagunemisilmingutest lõunaküljel LukuEksperti Büroohoone, mille kahjustuste protsent jäi 25% ulatusse. Kunstiakadeemia betoonpinnad, mis olid peamiselt avatud lõunaküljele, kuid mille betoonpinnad olid temperatuuride suurest kõikumisest kahjustunud ligikaudu 80% kogu betoonpinnast. Antud hoone põhiprobleemiks kujunes bioloogiline saastumine, mis väljendus sammaldumise ja vetikate kujul. Peamised lagunemisinähtused üldiselt hoonete lõunakülgedel hõlmasid järgnevaid ilminguid:

- ulatuslik pragunemine, suuremal määral murenemispraod;
- poorne betoonipinna struktuur;
- vihmavee kahjustused, intensiivsemad esteetilised kahjustused tumedamate ja heledamate pindade teke;
- bioloogiline saastumine avauste ja fassaadidetailide all peamiselt bakterite kolooniate näol;
- betooni delaminatsioon koos armatuuri korrosiooninähtustega;
- betoonipinna pigmendimuutus, heledam pinnavärvus.

Konstruktsioonide lääne- ja idakülje lagunemisilmingud sarnanesid üldjoontes lõunaküljel esinevate kahjustustega. Kahjustuste protsendiline esinemissagedus oli suuremas osas tingitud arhitektuursest ja konstruktiivsest lahendusest. Suuremal määral olid kahjustustest mõjutatud Toompuiestee 33a Büroohoone ja IT Kolledž.

Põhjapoolsetest konstruktsioonipindadest olid enim kahjustustest mõjutatud IT Kolledž 50% ning TTP Kontorihoonel ja Sisekaitseakadeemia, kus kahjustused jäid ligikaudu 35% piiresse. Väiksemal määral olid kahjustustest mõjutatud LukuEksperti Büroohoone

ning Toompuiestee 33a Büroohoone, kus lagunemisilminguid esines 20% ulatuses. Korrosiooninähtusteks kujunesid:

- intensiivne bioloogiline kasv sammaldumise ja vetikatena;
- veekahjustused, pinnad kauem niisked;
- pragunemine;
- kohati armatuuri korrosioon, peamiselt ebapiisavast armatuuri kaitsekihist.

### **Konstruksiooniosade kahjustused**

Hoonete lõikes esinesid konstruktsiooniosadel järgnevad ilmingud:

Soklijoon:

- veekahjustused, pidev märgumine;
- soolade ladestumine pinnale ja sellest tingitud lagunemine;
- pidev vahelduv märjalt külmumine ja sulamine;
- intensiivsem bioloogilisele saastumine;
- pragunemine ja delaminatsioon;
- betoonpinna kulumine;
- esteetilised kahjustused, tumedamad piirkonnad ning kollased laigud.

Fassaad:

- betoonpinna pragunemine;
- bioloogilise kasvu ilmingud. Intensiivsemad piirkondades, kus vihmavesi koguneb ja voolab mööda fassaadipinda;
- betooni delaminatsioon ja sellest tulenevat armatuuri korrosioon;
- esteetilised kahjustused vihmavee voolamisest.

Katusejoon:

- esteetilised kahjustused vihmaveest;
- bioloogiline saastumine, suuremal määral konstruktsiooni nurkades ja servades ning varjulistes piirkondades;
- õhusaaste ladestumine, pinna määrdumine mustaks.

### **Arhitektuursed, konstruktiivsed ja ehitustehnoloogilised lahendused**

Vaadeldavate konstruktsioonide lõikes ilmnevad erinevates piirkondades mitmesugused kahjustused, mis on tingitud nii arhitektuurilistest, ehitustehnoloogilistest kui ka betoonitehnoloogilistest puudustest:

- katlamajade ja mõne muu sarnase rajatise rajamine konstruktsiooni vahetuslähedusse, mis võimaldab saasteainetel otse konstruktsioonile sattuda soodustades sellega esteetilisi kahjustusi ning bioloogilist saastumist;
- puudulik sadevee äravoolusüsteem, mis viib suurema niiskumiseni ja bioloogilise kasvu tekkeni;
- horisontaalsete betoonpindade kaitsmata jätmine sokli-, fassaadi- ja katusepiirkonnas soodustavad vee kogunemist, voolamist ja bioloogilist saastumist;
- paneelide kaldpinnaline asetus tekitab vee voolamist mööda betoonpinda, jättes nähtavale heledamad ja tumedamad triibud, millega väheneb esteetiline väljanägemine;
- monteeritud hoonete vuukide bioloogiline saastumine ning sademete kogunemine;
- betoonpinna ebaühtlus ja karedus, mis soodustas vee imendumist ja vähendab betooni tugevust ning külmakindlust;
- tööde teostamine isetiheneva betooniga ei taga piisavat tihedust avade, nurkade ja servade ümbruses ning soodustab pragunemist.

Hooned, mis koosnesid monteeritud elementidest, olid väliskeskkonna mõjudest väiksemal määral mõjutatud, kui seda olid hooned, kus betoonitööd toimusid kohapeal, mille peamiseks põhjuseks on puudulik ehitustööde kvaliteet.

## Soovitused kahjustuste vältimiseks ja vähendamiseks

- Lõunaküljel kasutada päikesekaitsemeetmeid, nagu varikatused või konstrueerida hoone selliselt, et erilahendustega konstruktsiooniosad oleksid paigutatud ilmakaarte suhtes, kus toimub suurem temperatuuride kõikumine, ennetades sellega betoonpinna ülekuumenemist.
- Varjulistes piirkondades tuleks vältida liigseid konstruktsioonilisi erilahendusi, mis võivad piirata õhuvoolu ja soodustada niiskuse kogunemist. Oluline on hoida põhjaküljed avatuna ja takistusteta ning vältida niiskuse kogunemist, mis põhjustab betooni bioloogilist saastumist ja märgumist.
- Kõrgema betooniklassi ja spetsiaalsete pinnete kasutamine pakub lisakaitset veekahjustuste ja UV-kiirguse eest ning pikendab betooni eluiga. Oluline on jälgida betoonisegu koostise vastavust keskkonnaklassile.
- Vältida avausi, mis eenduvad või taanduvad fassaadipinnast ning kasutada lihtsustatud arhitektuurilahendusi, mis soodustavad piisavat õhu liikumist.
- Katta horisontaalsed pinnad täielikult, et vältida vihmavee kogunemist ja bioloogilise kasvu teket.
- Tagada betoonisegu piisav tihenemine ja tihendamine ka konstruktsiooni nurkades ja servades.
- Tagada piisav ja tõhus parapetiplekk katusejoonel vihmavee äravooluks ja konstruktsiooni kaitseks, ning jälgida nende tõhusust ja korralikku paigaldust või luua arhitektuurselt mitmekesisemaid katuselahendusi.
- Autoparklate rajamine hoonest eemale takistab soolade sisaldavate lumesulapritsmeid konstruktsiooni pinnale sattumast.
- Tagada konstruktsioonide kinnitusdetailide asetus selliselt, et kinnitusdetailid ei suunaks sademevett konstruktsiooni poole.
- Talvise perioodi hooldustööd, nagu lumehangede eemaldamine ja soklikääre korrapärane puhastamine, aitavad vältida lumest ja soolaveest tingitud kahjustusi.

- Regulaarne hooldus ja bioloogilise kasvu eemaldamine aitab vähendada kahjustusi soklipiirkonnas ning säilitada selle esteetilist välimust.

Kõigi nende vigade tulemusena ilmnesid hoone erinevates piirkondades mitmesugused kahjustused, sealhulgas pragunemine, tükkide eemaldumine, armatuuri korrosioon, märgumine, külmakahjustused, bioloogiline saastumine, pinna määrdumine ja mitmed muud eelpool mainitud ilmingud. Need tegurid mõjutavad nii hoone esteetilist välimust kui ka struktuurilist tugevust ning nõuavad täiendavaid parandusmeetmeid ja hooldustöid, et tagada hoone pikaajaline vastupidavus ja terviklikkus.

## JÄRELDUSED

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli kirjeldada, milline on raudbetoonkonstruktsioonide välispinna olukord aastate möödudes ning anda ülevaade, millised on enimlevinumad raudbetoonkonstruktsioonide lagunemise ilmingud „Aasta Betonehitis“ tiitliga tunnustatud hoonetel. Lisaks oli eesmärgiks mõista millistes tingimustes toimuvad lagunemisprotsessid ning millised tegurid mõjutavad raudbetooni lagunemisprotsesse ja nende kiirust.

Töö käigus analüüsiti erinevaid keskkonna- ja ehitustingimusi, mis võivad mõjutada raudbetoonkonstruktsioonide lagunemist, sealhulgas niiskust, temperatuuri kõikumisi, külmakahjustusi, keemilist korrosiooni ning ehituskvaliteedi probleeme.

Uurimistulemustest selgus, et raudbetooni lagunemisprotsessid on kompleksed ja neid mõjutavad mitmed erinevad tegurid. Puudulik ehituskvaliteet, ebasoodsad ehitustingimused ja keskkonnategurid on olulised kiirendavad faktorid konstruktsioonide lagunemisel, mis kõik suurendavad oluliselt lagunemisriski, eriti kui konstruktsioon ei ole nendele tingimustele vastupidavalt kavandatud ja ehitatud.

Kahjustuste ilmingud betoonpinnal on suuresti mõjutatud ehitustööde kvaliteedist. Kasutades isetihenevat betooni, tuleb veenduda, et piisav betoonisegu tihenemine toimuks ka konstruktsiooni nurkades ja servades, vastasel korral intensiivistuvad antud piirkondades keskkonna mõjude tõttu lagunemisprotsessid. Monteeritud elementide kasutamine annab suurema kindluse betoonipinna kvaliteedi osas, kui seda annavad monoliitsed pinnad.

Hoonete kavandamisel tuleb arvestada konstruktsioonide orienteeritust ilmakaarte suhtes, et vähendada keskkonnategurite negatiivset mõju. See tähendab, et hooned tuleks konstrueerida selliselt, et nende erinevad osad oleksid võimalikult väheste keskkonnategurite mõju all. Erinevate horisontaalsete pindade tekitamine konstruktsioonile ning nende katmata ja kaitsmata jätmine soodustab lagunemisilmingute võimalikkust antud piirkondades ning laiendab kahjustuste osakaalu ka suuremale pinnale.

Materjalide valik konstruktsioonides peab olema läbimõeldud, arvestades nende sobivust konkreetse konstruktsiooni ja ilmastikutingimustega. Õige kasutamise korral on iga materjal efektiivne ja vastupidav, kuid see eeldab nende kohandamist vastavalt keskkonnale, kus need paiknevad. Oluline on mõista, et igal materjalil on oma tugevused ja nõrkused ning nende tõhusaks kasutamiseks on vaja põhjalikke



teadmiseid ja oskuseid. Lisaks peab arhitektuuriline ja insenerilik lähenemine võtma arvesse kõiki eelpool mainitud tegureid, et tagada konstruktsioonide püsivus ja vastupidavus ka kõige raskemates ilmastikutingimustes.

# **SUMMARY AND RECOMMENDATIONS**

## **Building and facility orientation with respect to cardinal directions**

The orientation of the building and structure in relation to the cardinal points is an important aspect that emerged from the analysis. Damage was most prevalent on the southern, eastern, and western sides in terms of cardinal directions. Surfaces facing north generally remained in the best condition compared to surfaces on other cardinal directions.

Among the observed buildings, the most damage occurred on the southern sides of the structures. For example, Office Building 33a and TTP Office Building showed damage percentages of 90% and 85% respectively on the southern facade. The least affected by decay on the southern side was Lock Expert Office Building, with damage percentages around 25%. The Art Academy's concrete surfaces, mostly exposed to the south, suffered damage to approximately 80% of the total concrete surface, primarily due to temperature fluctuations. The main degradation phenomena on the southern sides of the buildings included extensive cracking, porous concrete surface structure, rainwater damage, biological contamination under openings and facade details, delamination of concrete along with reinforcement corrosion, and pigment changes resulting in a lighter surface color.

Degradation manifestations on the western and eastern sides of the structures were similar to those on the southern side. The percentage frequency of damage was largely due to architectural and structural design. Toompuiestee 33a Office Building and IT College were among the structures most affected by these damages.

On the northern construction surfaces, the most damage occurred at IT College (50%) and TTP Office Building and the Internal Security Academy, where damages were around 35%. Lock Expert Office Building and Toompuiestee 33a Office Building were less affected, with decay manifestations occurring around 20%. Corrosion phenomena included intense biological growth, water damage leading to prolonged wetness, cracking, and occasional reinforcement corrosion due to inadequate protection.

## **Damage to structural components**

The following manifestations were observed on structural components across the buildings:

#### Foundation Line:

- water damage and continuous dampness;
- salt deposition on the surface leading to decay;
- continuous alternating wetting and freezing;
- intense biological contamination;
- cracking and delamination;
- concrete surface abrasion;
- aesthetic damage with darker areas and yellow spots.

#### Facade:

- cracking of concrete surface;
- manifestations of biological growth, more intense where rainwater accumulates and flows along the facade surface;
- delamination of concrete leading to reinforcement corrosion;
- aesthetic damage from rainwater flow.

#### Roof Line:

- aesthetic damage from rainwater;
- biological contamination, particularly in corners, edges, and shaded areas;
- deposition of air pollutants, resulting in surface soiling.

### **Architectural, structural, and construction technological solutions**

Different areas of damage were observed in the observed constructions due to architectural, construction technological, and concrete technological deficiencies:

- placing boiler houses or similar facilities in close proximity to the structure allowing pollutants to directly affect the structure, thereby promoting aesthetic damage and biological contamination;

- inadequate stormwater drainage systems leading to increased moisture and biological growth;
- leaving horizontal concrete surfaces unprotected in the foundation, facade, and roof areas, promoting water accumulation, flow, and biological contamination;
- placement of panels causing water flow along the concrete surface, resulting in visible lighter and darker stripes, reducing aesthetic appearance;
- biological contamination of assembled building joints and accumulation of precipitation;
- unevenness and roughness of concrete surfaces, promoting water absorption, reducing concrete strength and frost resistance;
- the use of self-compacting concrete not guaranteeing sufficient density around openings, corners, and edges, promoting cracking.

Buildings consisting of prefabricated elements were less affected by environmental influences than buildings where concrete work was done on-site, primarily due to poor construction quality.

### **Recommendations for damage prevention and reduction**

- Use sun protection measures on the southern side, such as awnings or design the building in such a way that special construction parts are oriented towards cardinal points with higher temperature fluctuations, thereby preventing overheating of the concrete surface.
- In shaded areas, avoid excessive structural design solutions that may restrict airflow and promote moisture accumulation. It is important to keep the northern sides open and unobstructed to avoid moisture accumulation, which causes biological contamination and dampness.
- Use higher concrete classes and special coatings to provide additional protection against water damage and UV radiation, and prolong the life of concrete. It is important to ensure that the concrete mix complies with the environmental class.
- Avoid openings protruding or recessing from the facade surface and use simplified architectural solutions that promote adequate airflow.

- Completely cover horizontal surfaces to prevent water accumulation and biological growth.
- Ensure sufficient compaction and sealing of the concrete mix, especially around corners and edges.
- Ensure adequate and effective parapet metal sheeting at the roof line for rainwater drainage and structural protection, and monitor their effectiveness and proper installation, or create architecturally more diverse roof solutions.
- Placing car parks away from the building prevents salt-containing snowmelt from reaching the structure's surface.
- Ensure the placement of fastening details in such a way that they do not direct precipitation towards the structure.
- Winter maintenance activities such as removing snowdrifts and regularly cleaning foundation shears help prevent damage from snow and saltwater.
- Regular maintenance and removal of biological growth help reduce damage to the foundation area and maintain its aesthetic appearance.

As a result of all these errors, various damages occurred in different areas of the building, including cracking, spalling, reinforcement corrosion, dampness, frost damage, biological contamination, surface soiling, and several other aforementioned manifestations. These factors affect both the aesthetic appearance and structural strength of the building and require additional repair measures and maintenance to ensure the building's long-term durability and integrity.

## **CONCLUSIONS**

The aim of this master's thesis was to describe the condition of reinforced concrete surfaces over the years and to provide an overview of the most common manifestations of reinforced concrete deterioration in buildings recognized with the "Concrete Structure of the Year" award. Additionally, the aim was to understand the conditions under which degradation processes occur and the factors influencing the deterioration of reinforced concrete and its rate.

During the study, various environmental and construction conditions that may affect the deterioration of reinforced concrete structures were analyzed, including moisture, temperature fluctuations, frost damage, chemical corrosion, and construction quality issues.

The research revealed that reinforced concrete deterioration processes are complex and influenced by several factors. Poor construction quality, unfavorable construction conditions, and environmental factors are significant accelerating factors in the deterioration of structures, all of which significantly increase the risk of degradation, especially if the structure is not designed and built to withstand these conditions.

Damage manifestations on the concrete surface are largely influenced by construction quality. When using self-compacting concrete, it must be ensured that sufficient compaction of the concrete mix also occurs in the corners and edges of the structure; otherwise, degradation processes intensify in these areas due to environmental influences. The use of prefabricated elements provides greater confidence in the quality of the concrete surface than monolithic surfaces.

When designing buildings, the orientation of structures with respect to the cardinal points must be considered to reduce the negative impact of environmental factors. This means that buildings should be constructed so that their various parts are subject to as few environmental factors as possible. Creating different horizontal surfaces on the structure and leaving them uncovered and unprotected encourages degradation manifestations in these areas and increases the proportion of damage to a larger area.

The selection of materials in structures must be carefully considered, taking into account their suitability for the specific structure and weather conditions. When used correctly, each material is effective and durable.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Eesti Betooniühing. [www] <https://betoon.org/>
- [2] P. Noyce and G. Grevello, „Durability of Reinforced Concrete“, Structure Magazine, Jan. 2016. [Online]. Available at: <https://www.structuremag.org/?p=9459>
- [3] M. Moussard, P. Garibaldi and M. Curbach, „The Invention of Reinforced Concrete (1848 – 1906)“, *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, D. A. Hordijk ja M. Luković, Toim, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 2785–2794. doi: 10.1007/978-3-319-59471-2\_316.
- [4] L.-M. Raado, *Korrosioonikaitse ehituses*. Tallinn, Karl Öigeri Stipendiumifond, 2022.
- [5] G. De Schutter, *Damage to Concrete Structures*, 1. tr. London: CRC Press, 2013. doi: 10.1201/b12914.
- [6] Quality and Standards Authority of Ethiopia (QSAE), *ET ISO 13823: General principles on the design of structures for durability*, 2008.  
<http://archive.org/details/et.iso.13823.2008>
- [7] J. Vanamõisa, "*Raudbetoonkonstruktsioonide kestvuse hindamine toimivuspõhiste mudelitega. Durability assessment of reinforced concrete structures with performance-based models*", [Magistritöö], Inseneriteaduskond, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <http://digikogu.taltech.ee/et/item/43ea2b71-4326-4ce7-9b09-f2a64c0b200d>.
- [8] *EVS-EN 206:2014+A1:2016 BETOON. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus*, 2016. <https://www.evs.ee/et/evs-en-206-2014-a1-2016-consolidated>.
- [9] M. Kiisa. Betoonkonstruktsioonide projekteerimise alused. Osa 3. Kestvus. (2020, Kevad). Tallinn, Eesti: Tallinna tehnikakõrgkool. Loetud aadressil: [https://moodle.ttkk.ee/pluginfile.php/303919/mod\\_resource/content/3/Osa%203.%20Kestvus%20%5B2020-01%5D.pdf](https://moodle.ttkk.ee/pluginfile.php/303919/mod_resource/content/3/Osa%203.%20Kestvus%20%5B2020-01%5D.pdf)
- [10] *EVS-EN 1992-2:2005+NA:2008 Eurokoodeks 2: Betoonkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 2: Betoonsillad. Arvutus- ja detailiseerimisreeglid*, 2008.  
<https://www.evs.ee/et/evs-en-1992-2-2005-na-2008-consolidated>.

- [11] U. Helbig, H.-B. Horlacher and J. Stamm, „Mechanisms and Prediction of Hydroabrasion on Hydraulic Structures“, 2010. [Online]. Available at: <https://www.iahr.org/library/infor?pid=10941>
- [12] *EVS-EN 1992-1-1:2005+A1:2015+NA:2015 Eurokoodeks 2: Betoonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonetele*, 2015. <https://www.evs.ee/et/evs-en-1992-1-1-2005-a1-2015-na-2015-consolidated>.
- [13] L. Wang and Q. Zhang, „Investigation on water absorption in concrete after subjected to compressive fatigue loading“, *Constr. Build. Mater.*, vol. 299, pp. 123897–, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123897.
- [14] N. H. I. C. Fonseka and S. M. A. Nanayakkara, „Assessment of Concrete Durability by Surface Resistivity and Initial Surface Absorption“, *12th International Conference on Structural Engineering and Construction Management*, R. Dissanayake, P. Mendis, K. Weerasekera, S. De Silva, S. Fernando, ja C. Konthesingha, Toim, Singapore: Springer Nature, 2023, pp 603–620. doi: 10.1007/978-981-19-2886-4\_43.
- [15] M. Indnurm. (2015). Ehitiste restaureerimine. Loetud aadressil: <http://www.ekspro.ee/uploads/zy1uyfer3ux0ad4.pdf>
- [16] E. Fathalla, Y. Tanaka, K. Maekawa and A. Sakurai, „Quantitative Deterioration Assessment of Road Bridge Decks Based on Site Inspected Cracks under Stagnant Water“, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 17, pp. 16–33, jan 2019, doi: 10.3151/jact.17.16.
- [17] T. Kalamees. Hoonete konstruktsioonid. Katused. (2020). Tallinn, Eesti: Tallinna Tehnikaülikool
- [18] B. Blocken and J. Carmeliet, „A review of wind-driven rain research in building science“, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 92, pp. 1079–1130, nov 2004, doi: 10.1016/j.jweia.2004.06.003.
- [19] A. Erkal, D. D’Ayala and L. Sequeira, „Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials“, *Build. Environ.*, vol. 57, pp. 336–348, nov 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.05.004.



- [20] M. Unt, „Lammutamisele kuuluva hoone betoontarindite külmakindluse ja tugevuse uuring. Study of frost resistance and strength of concrete structures of a building subject to demolition“, [Magistritöö], Inseneriteaduskond, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/47ed38dd-85cb-404a-859d-bbe1cf90a642>.
- [21] R. Persidski, „Raudbetooni kloriidikindluse uurimine betooni tugevusklassi ja lisandi näitel. Analysis of chloride resistance of reinforced concrete by strenght class and admixture“, [Magistritöö], Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2015. [Online]. Loetud aadressil: [https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/2334/Rauno\\_Persidski\\_MA2015\\_EH\\_t%C3%A4istekst.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/2334/Rauno_Persidski_MA2015_EH_t%C3%A4istekst.pdf?sequence=4&isAllowed=y).
- [22] M. Suits, „Varajane raudbetoon Eesti arhitektuuris“, [Magistritöö], Kunstikultuuri teaduskond, Eesti Kunstiakadeemia, Tallinn, Eesti, 2009. [Online]. Loetud aadressil: <http://www.goodwin.ee/suits/magi/Magistrit%C3%A4Maris%20Suits>.
- [23] F. Vidal, R. Vicente and J. Silva, „Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention“, *J. Cult. Herit.*, vol. 37, nov 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.11.006.
- [24] S. Sharma, N. R. Murthy and C. Sumanth, „Effect of air pollution on building materials“, *Mater. Today Proc.*, may 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.631.
- [25] A. A. Almusallam, „Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete“, *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, no. 4, pp. 353–361, aug 2001, doi: 10.1016/S0958-9465(01)00007-5.
- [26] G. M. Moelich, J. E. van Zyl, N. Rabie, ja R. Combrinck, „The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete“, *Cement and Concrete Composites*, vol. 123, pp. 104182, okt 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104182.
- [27] „Sun Damage to Concrete - What You Need to Know“, TRP READY MIX. [Online]. Available at: <https://trpreadymix.com/sun-damage-concrete-whats-story/>

- [28] R. Wasserman, „Behaviour of concrete structures upon the impact of UV and rain of natural acidity pH”, *Sci. Isr. - Technol. Advant. "Scientific Herald" Voronezh State Univ. Archit. Civ. Eng.*, vol. 14, pp. 130–147, march 2014.
- [29] S. Kaewunruen, L. Wu, K. Goto and Y. Najih, „Vulnerability of Structural Concrete to Extreme Climate Variances”, *Climate*, vol. 6, pp. 40, may 2018, doi: 10.3390/cli6020040.
- [30] K. Konsa and K. Pilt, *Hoonete biokahjustused*. Eesti Mükoloogiuuringute Keskus, Tartu, 2012. Loetud aadresssil: [https://projects.centralbaltic.eu/images/files/result\\_pdf/FABBI\\_result5\\_Hoonete\\_biokahjustused.pdf](https://projects.centralbaltic.eu/images/files/result_pdf/FABBI_result5_Hoonete_biokahjustused.pdf)
- [31] J. F. Márquez, M. Sanchez-Silva and J. Husserl, „Review of reinforced concrete biodeterioration mechanisms”, *Proc. 8th Int. Conf. Fract. Mech. Concr. Struct. Fram. 2013*, pp. 2088–2096, jan 2013.
- [32] T. Kalamees jt., "Eesti eluasemefondi ehitustehniline seisukord - ajavahemikul 1990-2010 kasutusele võetud korterelamud: uuringu lõpparuanne", Tallinna Tehnikaülikool, ehitusteaduskond, TTÜ Kirjastus, Tallinn, Eesti, 2012. [Online]. Loetud aadressil: <https://ws.lib.ttu.ee/digibase/et/Publ/Item/f71709a5-eeac-4249-9957-d4ebbaa3c079>
- [33] D. Wang, F. Guan, C. Feng, K. Mathivanan, R. Zhang and W. Sand, „Review on Microbially Influenced Concrete Corrosion”, *Microorganisms*, vol. 11, no. 8, Aug. 2023. doi: 10.3390/microorganisms11082076.
- [34] N. Makul, R. Fediuk, ja M. Szelag, „Advanced interactions of cement-based materials with microorganisms: A review and future perspective”, *Journal of Building Engineering*, vol. 45, pp. 103458, jan 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103458.
- [35] S. Nazarenko, „Täiteainete mõju betooni külmakindlusele ja survetugevusele. The influence of aggregates to the frost resistance and compression strenght of concrete”, [Ehistusinseneriõppe lõputöö], Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2018. [Online]. Loetud aadressil: [https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/4315/Sergei\\_Nazarenko\\_EH\\_mag\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/4315/Sergei_Nazarenko_EH_mag_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

[36] H. Li, H. Guo and Y. Zhang, „Deterioration of concrete under the coupling action of freeze–thaw cycles and salt solution erosion“, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 61, no. 1, pp. 322–333, Jan. 2022, doi: 10.1515/rams-2022-0025.

[37] Maa-amet, „Fotoladu - aerofotode digitaalarhiiv“. [www]  
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/kaardirakendused/fotoladu/fotoladu-aerofotode-digitaalarhiiv-p545.html>

[38] Google Maps. [www] <https://www.google.com/maps>

[39] U. Kallavus, "Kivipinnalt kraabitud punaka pulbri analüüs", Materjaliuuringute Teaduskeskuse labor, Tallinna Tehnikaülikool, 2024.