



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Tartu Kõlledž

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

LAMMUTAMISELE KUULUVA HOONE BETOONTARINDITE KÜLMAKINDLUSE JA TUGEVUSE UURING

STUDY OF FROST RESISTANCE AND STRENGTH OF
CONCRETE STRUCTURES OF A BUILDING SUBJECT TO
DEMOLITION

Üliõpilane: Marko Unt

Üliõpilaskood: 153844EAEI

Juhendaja: Mihkel Kiviste, professor
Aime Ruus, dotsent

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

24. mai 2021

Autor: Marko Unt
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

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

Juhendajad:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina,

Marko Unt,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Lammutamisele kuuluva hoone betoontarindite külmakindluse ja tugevuse uuring,

mille juhendajad on professor Mihkel Kiviste ja dotsent Aime Ruus.

- 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.

_____ (kuupäev)

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

Üliõpilane: **MARKO UNT**

Üliõpilaskood **153844EAEI**

Õppekava: **EAEI02/12Tartu - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**
Peaeriala: **Ehitiste restaureerimine**

Lõputöö teema:

**Lammutamisele kuuluva hoone betoontarindite külmakindluse ja tugevuse
uuring**

STUDY OF FROST RESISTANCE AND STRENGTH OF CONCRETE STRUCTURES OF A
BUILDING SUBJECT TO DEMOLITION

Juhendaja: **Mihkel Kiviste,
Aime Ruus**

Mihkel.Kiviste@taltech.ee
Aime.ruus@taltech.ee

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida lammutusele kuuluva hoone betoontarindiosade seisukorda
2. Uurida lammutusele kuuluva hoone betoontarindiosade külmakindlust
3. Uurida lammutusele kuuluva hoone betoontarindite tugevust

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Objektiga tutvumine ning esmased uuringud	16.11.2020
2.	Uuringute jätkamine objektil	23.11.2020
3.	Uuringute jätkamine objektil	27.11.2020
4.	Uuringute dokumenteerimine, mõõtmised	27.12.2020
5.	Kirjanduse läbitöötamine	31.03.2021
6.	Katsekehade katsetamise algus	07.04.2021
7.	Katsetamiste lõpp ja dokumenteerimine	19.05.2021
8.	Kirjandus ja metoodika	21.05.2021
9.	Katsetulemused ja järeldused	23.05.2021
10.	Kokkuvõte eesti keeles	24.05.2021
11.	Kokkuvõte inglise keeles	24.05.2021

**Lõputööde 95% ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise
eelduseks**

24.05.2021

Lõputöö esitamise tähtaeg:

24. mai 2021

Lõputöö ülesanne välja
antud: 01.03.2021

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Avalikustamise
piirangu puuduvad
tingimused:

SISUKORD

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	3
SISUKORD	7
EESSÕNA	9
SISSEJUHATUS	10
1. Ülevaade betooni kahjustavatest protsessidest ning betooni tugevuse uurimisest objektil.....	11
1.1 Süsinikumahukuse vähendamine.....	11
1.2 Betooni lagunemine ja tugevus	12
1.2.1 Raudbetoonis oleva terrassarruse korrosioon	12
1.2.2 Karboniseerumine	13
1.2.3 Kloriidide sissetung.....	14
1.2.4 Külmaskindlus.....	15
1.2.5 Betooni tugevusnäitajate uurimine	16
1.3 Betooni uurimine ehitusobjektil	18
2. Metoodika.....	23
2.1 Näidishoone - tüüpprojektiga koolihoone	23
2.1.1 Ehitise iseloomustus enne lammutamist	24
2.2 Uuritavad tarindid	25
2.2.1 Trepimademetek olukord enne katsetamist	27
2.2.2 Raudbetoonitola olukord enne katsetamist	28
2.2.3 Raudbetoonplaatide olukord enne katsetamist	30
2.3 Uuringu metoodika	31
2.3.1 Visuaalne vaatlus	31
2.3.2 Mittepurustav katsetamine	31
2.3.3 Katsekehade väljapuurimine	33
2.3.4 Karboniseerumissügavuse mõõtmine	34
2.4 Katsekehade purustav katsetamine	35
2.4.1 Katsekehade mõõtu lõikamine	35
2.4.2 Katsekehade mõõtmine.....	36
2.4.3 Survekatse	37
2.4.4 Armatuuri hindamine konstruktsioonis	38
2.4.5 Külmaskindlus.....	41
3. Katsete tulemused ja analüüs	47
3.1 Visuaalne vaatlus	47

3.2	Karboniseerumise katsete ja korrosiooni hindamise tulemused ja analüüs ...	48
3.2.1	Betooni karboniseerumissügavuse uuringu tulemused.....	48
3.2.2	Armatuuri korrodeerumine	52
3.3	Betooni survetugevusklassi määramine	57
3.3.1	Betooni survetugevusklassi määramine mittepurustaval meetodil.....	57
3.3.2	Betooni survetugevusklassi määramine purustaval meetodil	59
3.3.3	Mittepurustav katse ja purustava katse võrdlus.....	66
3.4	Külmakindluse katsed	67
3.4.1	Külmakindluse tulemused.....	67
3.4.2	Külmumiskindluse kokkuvõte.....	77
3.5	Katsetulemuste järelused	78
3.5.1	Alumine trepimademe katsetulemuste järelused	78
3.5.2	Ülemise trepimademe katsetulemuste järelused	79
3.5.3	Raudbetoonplaadi katsetulemuste järelused	79
3.5.4	Raudbetootala katsetulemuste järelused	80
	Kokkuvõte	82
	SUMMARY	84
	Kasutatud kirjandus.....	86
	Lisad	91

EESSÕNA

Magistritöö koostati ja sõnastati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledžis koostöös juhendajatega. Juhendajateks olid professor Mihkel Kiviste ja dotsent Aime Ruus. Töö praktiline osa viidi läbi osaliselt lammutusele kuuluval objektil Valgas ning Tartu Kolledži laboris. Katsete tegemistel, tulemuste kirjeldamistel aitasid lisaks juhendajatele ka teised õppejõud - Egge Haiba, Ernst Tungel ja Jane Raamets. Tänan ettevõtet Marico Metall OÜ-d, kes lubas ja aitas teostada uuritavatele tarinditele katseid. Suured tänud kõigile, kes aitasid kaasa lõputöö valmimisele.

Võtmesõnad: külmumis-sulamis katsed, põrkevasara katsed, purustavad katsed, magistritöö

SISSEJUHATUS

Käesolev magistritöö eesmärk on hinnata betoonkonstruktsioonide seisundit peale pikemat (ligikaudu 50 aastat) eksploatatsiooni ning nende tugevust mittepurustaval ja purustaval meetodil.

Betoon on kõige enam toodetud ehitusmaterjal maailmas. Aina enam räägitakse betooni CO₂ jalajälje vähendamisest. Betooni valmistamiseks kasutatakse joogivett ning tootmise tulemusena eraldub süsihappegaasi. Selle vähendamiseks tuleks leida võimalusi, mille tulemusena taaskasutataks vanasid betoonkonstruktsioone.

Euroopa Liit on võtnud kohustuseks luua aastaks 2050 vähese CO₂ -heitega süsteem, kus Eesti Vabariik, kui Euroopa Liitu kuuluv riik, on ka endale kohustuseks võtnud süsinikjälje vähendamise. Selleks koostas Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium koos Tallinna Tehnikaülikooliga pikaajalise strateegia hoonete rekonstrueerimiseks. Antud strateegia keskendub enne 2000. aastat ehitatud hoonete rekonstrueerimisele.

Vanu betoonkonstruktsioone uuritakse enamasti mittepurustaval meetodil. Mittepurustaval meetodil uurimine ei riku olemasolevat konstruktsiooni, kus mittepurustava meetodi tulemused võivad varieeruda ühest äärmusest teise ning ei saa olla kindel katsete tulemustes. Selleks, et tõlgendada mittepurustaval meetodil saadud tugevust peab teostama purustavaid katseid võrdluseks. Purustaval meetodil enamasti lõhutakse/nõrgestatakse betoonkonstruktsiooni katsekehade kättesaamiseks. Kombineerides meetodeid omavahel, saame luua seose mittepurustava meetodi katsetulemuste tõlgendamise betooni survetugevuseks.

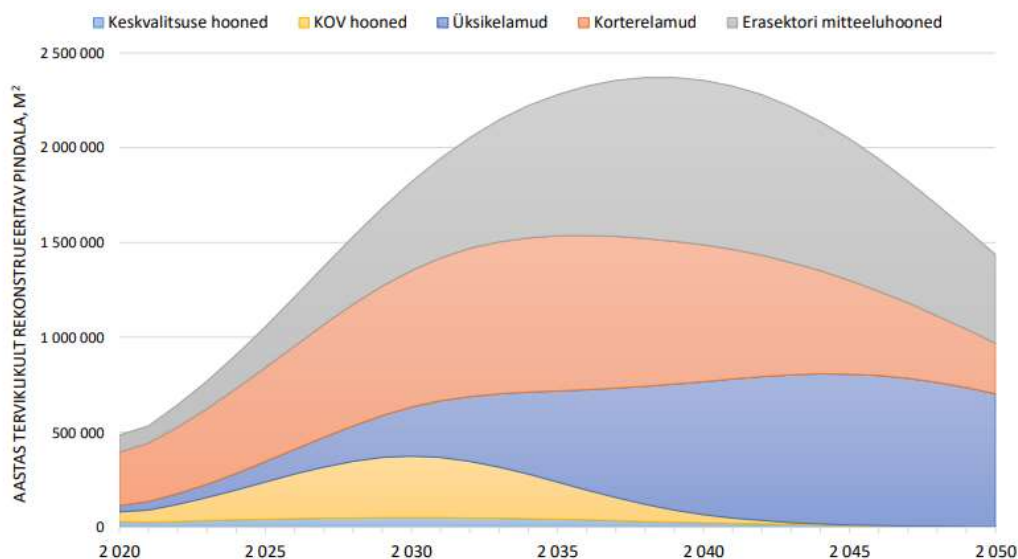
Magistritöö esimeses osas on kirjeldatud betooni peamisi lagundamisprotsesse ning mittepurustavat meetodit katsetamiseks. Teises osas on kirjeldatud autori katse meetodikat, kolmandas osas katsete tulemused ja järeldused.

Pikemas perspektiivis on eesmärgiks olemasolevate konstruktsioonide baasil hinnata materjali taaskasutuse potentsiaali. Käesolevas töös on keskendutud olemasoleva konstruktsiooni tugevusnäitajatele ühe objekti baasil, objektil teostati Schmidt'i pörkevasara katseid ja laboris survetugevuskatsed ning külmumis-sulamis katseid.

1. ÜLEVAADE BETOONI KAHJUSTAVATEST PROTSSESSIDEST NING BETOONI TUGEVUSE UURIMISEST OBJEKTIL

1.1 Süsinikumahukuse vähendamine

Euroopa Liit on võtnud vastu hoonete energiatõhususe direktiivi, kus on võetud kohustuseks luua 2050. aastaks vähese CO₂-heitega energiasüsteem [1]. Antud energiasüsteemi rajamiseks on Eesti Valitsus kiitnud heaks Majandus- ja Kommunikatsiooni Ministeerium tellitud „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia“ [2]. Strateegias on välja toodud, et enne 2000. aastat ehitatud hooned on vajalik rekonstrueerida 2050. aastaks, mille pindala võib küündida kuni 2,3 miljonit m² aastas[3].



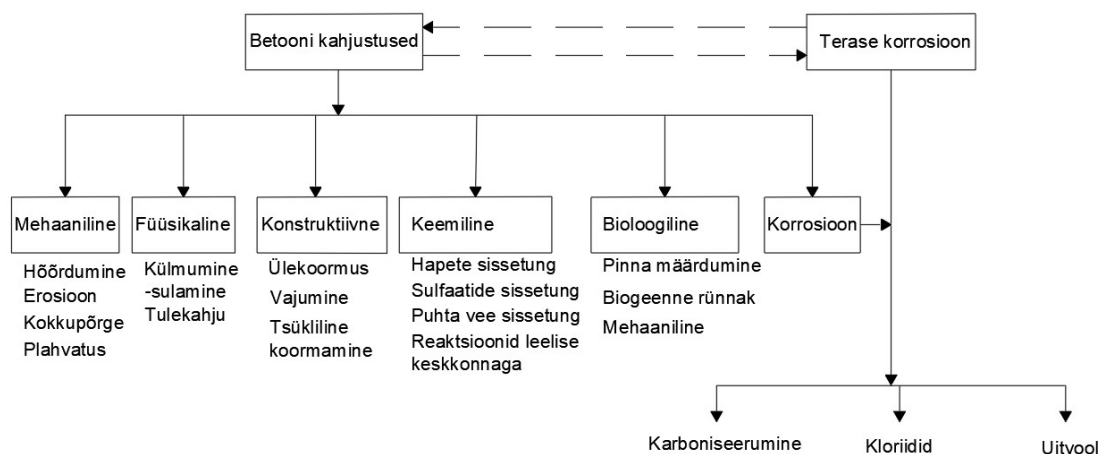
Joonis 1.1 Kumulatiivne aastane rekonstrueerimise vajadus [3]

Uuringus prognoositakse seda, et aastaks 2050 on kasutusest langenud välja kuni 5000 korterelamut ja kuni 10 000 mitteeluhoonet. Antud hooned, mis seisavad tühja ning kasutusest, tuleks lammutada, et säilitada asularuumi täisväärtuslik funktsionaalsus.[3]

1.2 Betooni lagunemine ja tugevus

Globaalne probleem on kliima soojenemine, mis toob endaga kaasa süsinikdioksiidi, temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse tõusu. Kõige probleemsem on süsinikdioksiidi tõus, mis põhjustab raudbetoonis terase korrosiooni karboniseerumise näol. [4][5]

Betooni kahjustused võivad tekkida erinevatel viisidel (joonis 1.2).



Joonis 1.2 Betooni kahjustused [6]

1.2.1 Raudbetoonis oleva terassarruse korrosioon

Raudbetooni korrosioon on viimastel aastakümnetel peetud üheks peamiseks raudbetoonkonstruktsiooni vastupidavuse probleemiks [7]. Korrosioon, kui terase roostetamine, toimub keemilise või elektrokeemilise reaktsiooni tagajärjel [8]. Terasse korrosioon betoonis on tingitud põhiliselt betooni karboniseerumisest ning kloriidide sissetungist [9].

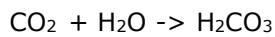
Betoonis korrosiooni oht puudub, kui betoon ei sisalda terast. Puudub ka siis, kui betoon sisaldab terast, kuid paikneb kuivas keskkonnas. Raudbetoonis oleval terasel tekib korrosioon (roostetamine) vee ja hapniku olemasolul [9][10]. Betooni mikroskoopilistes poorides on kõrge kaltsiumi-, naatriumi ja kaaliumoksiidide olemasolu ning nende kokkupuutel veega tekib väga aluseline keskkond, kus pH tase on 12-13. Aluseline keskkond tekitab terasele passiivse kile, mis kaitseb terast korrodeerumisest betoonis[9].

Terasse korrosiooni tekkimisel esineb betoonis asetseval terassarrusel korrosiooniproduktide kasv, mis võib olla pea kaks korda suurem esialgsest terasemahust. Puutudes kokku veega, paisub maht veelgi pea kuus kuni kümme korda

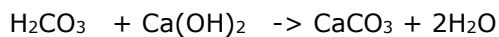
[9]. Mahu suurenemisel tekivad betoonis kahjustused. Kahjustuste liikideks on betooni pragunemine, killustumine, sarruse roostetamine ja võib isegi tekkida konstruktsiooni täielik purunemine [11].

1.2.2 Karboniseerumine

Karboniseerumine tekib atmosfääris oleva süsihappegaasi reageerimisel betooni aluselise keskkonnaga, mille tulemusel tekib süsihape. Süsihape neutraliseerib kokkupuutel tsemendiga aluselise poorivee, moodustades enamjaolt kaltsiumkarbonaadi [9][12]:

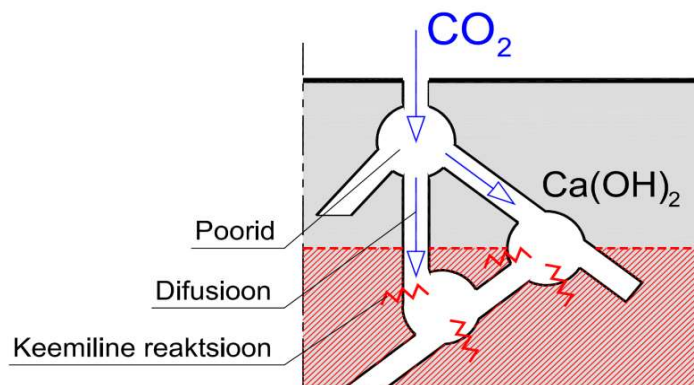


Süsinikdioksiid + vesi $\rightarrow$ süsihape



Süsihape+ kaltsiumhüdroksiid $\rightarrow$ kaltsiumkarbonaat + vesi

Betooni poorides leidub palju rohkem kaltsiumhüdroksiidi, kui suudab lahustuda poorivees. See aitab tagada betoonis 12-13 pH taseme, mil karboniseerumisreaktsioon esineb. Süsihappegaasi reageerimisel lahuses oleva kaltsiumi (ja teiste) hüdroksiididega, reageerib lõpuks kogu kaltsiumhüdroksiid, sadestades kaltsiumkarbonaadi ja laseb pH-l langeda tasemele, kus teras hakkab korrodeeruma (joonis 1.3). Karboniseerumise kahjustus esineb kõige rohkem seal, kus betooni kaitsekiht terasel on kõige väiksem. [9]



Joonis 1.3 Karboniseerumise protsess [13]

Chen ja teised [4] on välja toonud enda betooni karboniseerimis uuringus, et mida suurem on vesitsementtegori suhe, seda kiiremini karboniseerub betoon võrreldes

madalama vesitsementtegi suhtega betooniga. Seega süsinikdioksiidi tõus maailmas võib halvendada olemasolevaid betoonkonstruktsioone märksa kiiremini.

Karboniseerumist mõõdetakse pH-indikaatoriga, peamiselt kasutatakse fenoolftaleiini lahust [9][11][14]. Piserdades värskest avatud betoonosale (välja puuritud silindritele, betooni killud vms) fenoolftaleiini muutub betoonipind punakaslillakaks. See tähendab, et betoonis on kõrge pH tase (aluseline keskkond ehk karboniseerimata osa, $\text{pH} > 9$), värvuse mitte muutumisel on betoonis madal pH tase (neutraalne keskkond ehk karboniseerunud osa, $\text{pH} < 8,2 \dots 9,8$) [9][11].

1.2.3 Kloriidide sissetung

1960ndatel avastati raudbetooni üheks peamiseks korrosiooni põhjustajaks kloriidid [15]. Kloriidid satuvad betooni kahel viisil, kas tungides väliskeskkonnast betooni või on kloriidid betoonisegu valmistamisel sisse segatud. Betoonisegusse võivad sattuda kloriidid valmistamise käigus järgmiselt:

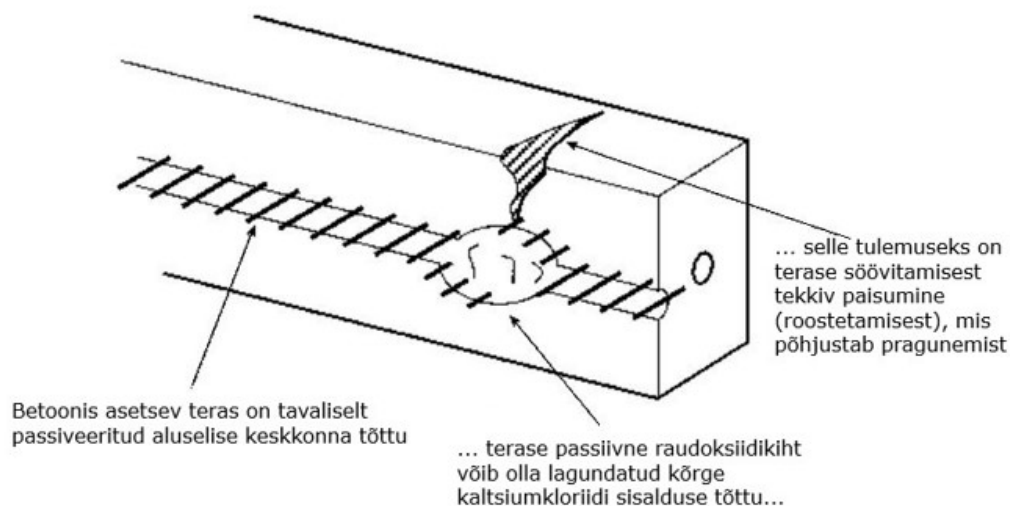
- Kloriidi sisaldavad betooni kiirendite lisamine (levinum CaCl_2 , kasutati 1970 aastate keskpaigani)
- Merevee kasutamine
- Saastunud täitematerjalid

Kloriidid võivad sisse tungida betooni järgmistel juhtudel:

- Mereveega kokkupuude (mereäärne ala)
- Jääsulatamis soolad
- Kemikaalide kasutamine

Erinevalt karboniseerumisest, kus aluseline keskkond neutraliseeritakse, lõhuvad kloriidid terasel passiivset oksiidikihti ning ei mõjuta pH taset betoonis. [9]

Betoonis on aluseline keskkond, mis kaitseb terast korrosiooni tekkimise eest. Betooni mõjutavad paljud keskkonnamõjud, millest ühed peamised on soolad. Soolad tungivad järkjärgult betooni sisse kuni sarruseni, kus algab sarruse korrodeerumine. Korrodeerumise tulemusena tekib sarruse ümber rooste, mis tekitab konstruktsioonis sisepingeid. Pingete jaotamisel tulemusel tekivad konstruktsiooni praod (joonis 2.4).[15]



Joonis 1.4 Betooni pragunemine [15]

Kloriidide sissetung toimub betoonis siis, kui kloriidioonid suurendavad betooni poorivees elektrijuhtivust, mis kiirendab omakorda terassarruse passiivse kihi lõhkumist. Sissetungi tulemuseks on terase lokaliseeritud tugev aukkorrosioon. Roostetava terase paisumine põhjustab betooni punnitamise või pragunemise ning betooni pinnale võib ilmned roostemärgid. [15]

Terasosadeta betoonis võib kasutada merevett, milles lahustunud soolade hulk võib küündida kuni 35000 miljoni osakeseni (parts per million). Betoon, millesse on segatud merevett võib olla suurem algne tugevus, kuid hiljem tugevus on madalam kui normaalbetoonil veega. Merevesi ei ole sobilik raudbetooni tootmiseks, kuna vesi sisaldab kloriide. [16]

1.2.4 Külmakindlus

Betoonkonstruktsioonid on projekteeritud pika elueaga ning madalate hoolduskuludega, kuid avatud betoonkonstruktsioonidele on üks suurimaid väliskeskkonnamõju tegur külmumine ning sulamine, veel kahjustavam koos soolade ja kemikaalide kokkupuutel.[16]

Kui temperatuur langeb alla 0°C (Celsiuse kraadi) võivad vett sisaldavad poorid jäätudes põhjustada betooni mahu suurenemise kuni 9 protsendi võrra. Pinged betoonis võivad

põhjustada pinna ketendamise, pragunemise või killustamise, kuid ka lõpuks täieliku purunemise. [6]

Välismõjudele avatud betoonil võib külmumiskahjustused ilmnedagi siis, kui betooni poorides on piisavalt niiskust. [17]

Enamasti on betooni kahjustumine tingitud keskkonnamõjudest, veega küllastusastmest, külmumis-sulamis tsüklitest, jäätumise mahust ja kõige madalamast temperatuurist. Betooni halvendab ka jäätumisevastaste soolade, kaltsium- ja naatriumkloriidi, kasutamine. Betoonipinnad, mis on sooladega kokku puutunud on vastuvõtlikumad külmumisele vaatamata külmumispunkti alanemisele. [6]

Eestis määratakse betooni külmakindlust standardi EVS 814:2020 järgi [18]. Betooni külmakindlus on omadus vastu pidada külmumis-sulamis tsüklitele ilma kahjustusteta [19]. Külmumiskindlus määratakse tulenevalt külmumis-sulamis tsüklikest, kus teatud arvu tsüklite möödumisel arvutatakse betooni massikadu. Betoon peab vastu pidama teatud arvu tsükleid enne lagunemist. Vee küllastumisaste mõjutab betooni külmakindlust. Tuleb arvestada ka vesitsementteguri suhtest tulenevat poorsust. Halvasti tihendatud betoonis tekivad õhuga täidetud poorid, mis võivad olla kasulikud, kuna need koguvad kapillaarides tekkinud jääkristallidest vett ning alandavad rõhku. Väga poorne betoon samas hõlbustab vee liikumist betoonis ning annab rohkem ruumi jääkristallide tekkimisele. Poorne betoon küllastub kiiremini veega ning on külmatundlikum. Praktika on näidanud, et kõige vastupidavam külmumisele on kõige väiksema vesitsementteguri suhtega tihendatud betoon, külmakindlus suureneb kui väheneb vesitsementteguri suhe betoonis [20]. Kuiv betoon, mille sisemine õhuniiskuse on alla 75-80%, on külmumisele vastupidav [17].

1.2.5 Betooni tugevusnäitajate uurimine

Karl Öiger on enda „Ehitiste Renoveerimine“ raamatus toonud välja ehitiste tugevdamise vajalikkuse, kui [13]:

- On tekkinud avariiline eelne seisund
- On tekkinud purunemine (pragunemine, k.a kõik muud kahjustused)
- On vaja tõsta olemasoleva konstruktsiooni kandevõimet

Selleks, et hinnata olemasolevat olukorda, peab teostama uurimistöid objektidel. Tuleb panna paika eesmärgid, kas piisab ainult väikestest remonttöödest või peab ette võtma suuremad remonttööd. [13]

Tugevusehinnangu uurimistöid on teostanud objektidel mitmeid, kus on uuritud raudbetoonvahelagede seisukorda, paneelmajade seisukorda ja korrosiooni.

Eesti Maaülikooli (EMÜ) magistritöös on uuritud 100 aasta vanuse vahelae seisukorda, kus olemasolevas vahelaepaneelil oli betoonis asetsev terrassarrus korrodeerunud ning betoon läbi karboniseerunud niiskete olude tõttu. Autor katsetas töös ülespööratud betoonribidega plaatvahelae koormamist veeanumatega ning hindas läbipainde siiret ning leidis, et kui koormata vahelagesid, siis üksikterastalad ei tööta üksinda ning kannavad raskusjõu edasi teistele naabertaladele, kus vahelae konstruktsioon töötab tervikuna. [21]

Targo Kalamees ja teiste poolt koostatud "Eesti eluasemefondi suurpaneel-korterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga" uuringus on uuritud muuhulgas ka paneelmajade betooni seisukorda. Uuriti betooni külmakindlust, survetugevust, karboniseerumist, terrassarruse korrodeerumist ja betooni sisaldavaid soolasid. Külmakindluse tulemil vastasid 24 katsekehast külmakindluse klassi KK1 nõuetele ainult 46% katsekehadest. Valimis ei esinenud ühtegi hoonet, millest võetud kõik katsekehad oleksid vastanud KK1 nõuetele. Survetugevuse määramisel kasutati mittepurustavat katsemeetodina Schmidti vasarat ja purustavat katsemeetodit, kus pandi omavaheline seos tulpdigrammi ning oli märgata Schmidti vasaral suuremaid survetugevusi kui purustavalt katsete survetugevused. Karboniseerumissügavus oli keskmiselt kaks kuni kolm sentimeetrit, kuid leidis ka viie kuni seitsme sentimeetri sügavusel karboniseerunud betooni. Fassaadibetoonil oli karboniseerumissügavus suurem seal, kus fassaad oli kaetud ainult värvkattega ning väiksem seal, mis oli kaetud kivipuistega. Korrosiooniuuringul täheldati, et vanimal, 47 aastasel elamul, oli terrassarruse korrosioon kaugele arenenud. [11]

Saleem ja teised uurisid olemasoleva täielikult ehitamata hoone raudbetoonplaate. Hoone pidi tulema 12 korruseline, kuid ehitus jäi seisma kaheksandal korrusel. Antud hoone oli avatud kaheksa aastat ning uuriti olemasolevale hoone tugevusnäitajaid. Uuringus uuriti kohapeal koormamist, selle läbipainet koos visuaalse vaatlusega ning puursüdamikega hinnati survetugevust. Kaheksa laepaneeli uuriti ning uuringute tulemusel hindasid autorid esimese korruse raudbetoonplaadi seisundit kehvaks ning soovitasid lammutada ja rekonstrueerida. Teised raudbetoonplaadid pidasid vastu koormamisele ning survetugevus oli piisav. [22]

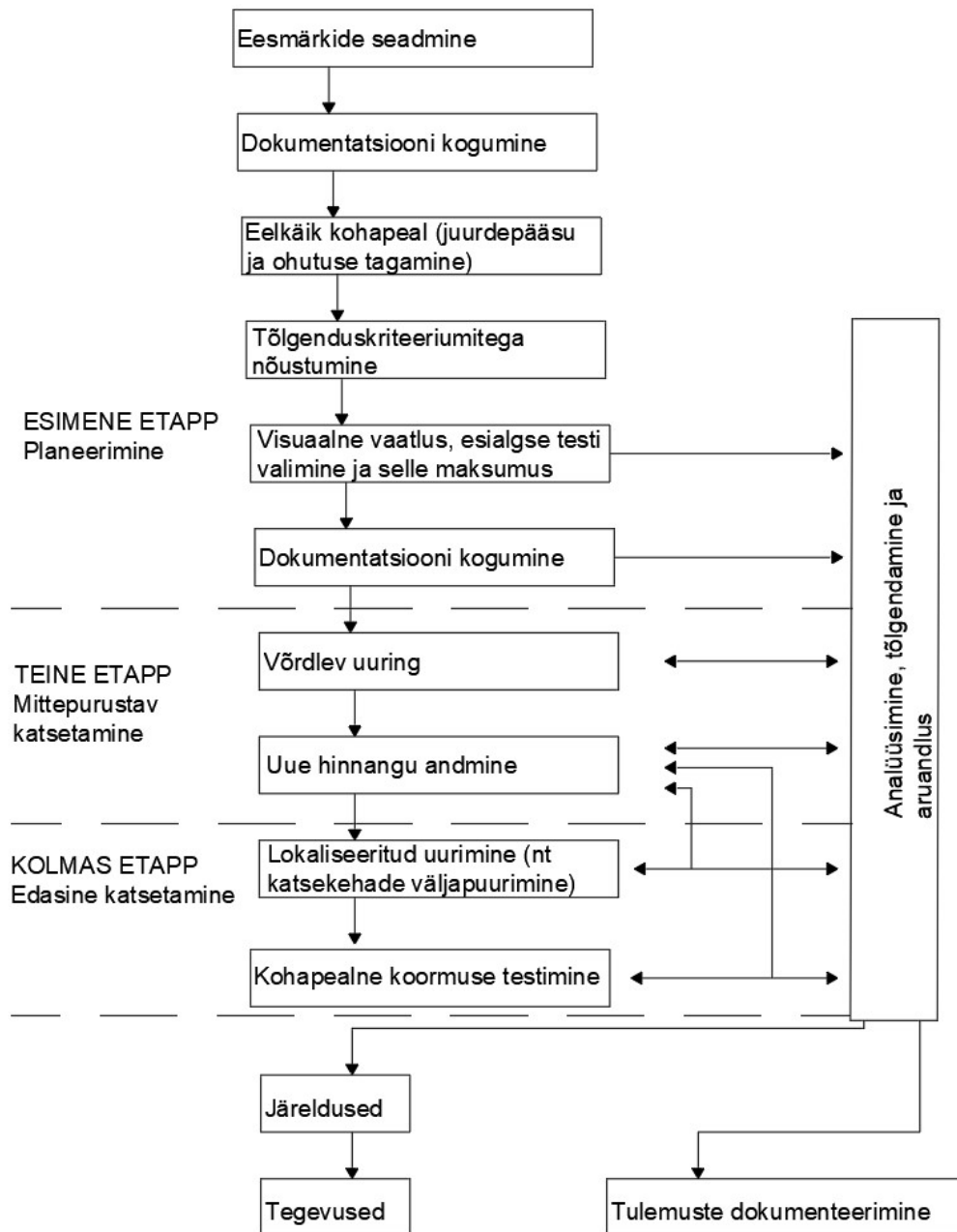
Mihkel Kiviste on uurinud enda magistritöös olemasolevate ribipaneelide armatuurterase korrosiooni ning selle mõju kandevõimele. Antud uuringus leidis autor, et ribipaneelide terrassarruse betoonkaitsekihi mahapudenemine ei olnud kriitilised kandevõimele, kuid kui ristlõige oli terasel vähenenud 20% või enam, siis mõjutab antud asjaolu armatuuri purustavat jõudu, mis võib jääda alla normatiivse väärtuse. [23]

Mihkel Kiviste on uurinud enda doktoritöös olemasolevate raudbetootarindite seisundit ja jääkkandevõimet. Uuritavatel objektidel teostati eelnevalt visuaalne vaatlus, kus hinnati betootarindite seisukorda. Autor täheldas, et enamus uuritavatelt postidel ja taladelt oli betoonkaitsekiht eraldunud. Postidest ja taladest puuritud kärnade survetugevused ületasid projekteeritud vastavat betoonitugevusklassi (endise Nõukogude Liidu projektis käsitletud tugevust), kuid antud survetugevused ei vasta enam tänastele nõutele. [24]

1.3 Betooni uurimine ehitusobjektil

Iga konstruktsioon on konstrueeritud püsima teatud arv aastaid. Konstruktsioonide püsivuseks on vaja hooldada ning remontida. Raudbetooni kasutatakse laialdaselt erinevate konstruktsioonide lahendamiseks, mille kahjustused on enamasti koormusest tulenev stress ja seisundi kahjustumine ajas. Enamasti kõrvaldatakse defektid, praod, lekkesid tänapäeva parandusteks ettenähtud tehnoloogiaga, kuid kui hoone pragunemine on märgatav, on vajalik rekonstrueerida kahjustunud osad. [25]

Visuaalne vaatlus on üks esimesi tegevusi hoone ülevaatusel. Enne hoone ülevaatuskogutakse informatsiooni hoone ajaloo kohta näiteks: ehitusplaanid, täiendused ja muudatused. Inspekteerija peab objektil tuvastama kandvad konstruktsioonid ning mittekanvad konstruktsioonid. Konstruktsioonide uurimisel tuleb vaadelda, kas esineb pragunemisi, vee läbijookse, vajumist ja terase korrosiooni (joonis 1.5). Esimese visuaalse vaatluse peaks tegema hoonele kogenud spetsialist [26]. Kuid visuaalsel vaatlusel võidakse hinnata betoonkonstruktsiooni püsivust valesti, kuna välisel vaatlusel ei saa märgata betooni sisemuses asetseva terrassarruse korrosiooni või muid varjatud defekte. Seega visuaalse vaatluse käigus tehtud otsused, järeldused võivad olla kaheldava väärtusega. Visuaalne vaatlus on inspekteerija subjektiivne hinnang [27][28].



Joonis 1.5 Tüüpiline objektuurimine [29]

Tihti on tarvis hinnata konstruktsioonide seisundit objektil – seda nii restaureerimise, renoveerimise või antud töö kontekstis ka taaskasutamise potentsiaali hindamiseks. Uurimismeetodid varieeruvad visuaalsest vaatlemisest, kohapeal katsetamisest kuni laboratoorsete katseteni. Peamiselt on kolm meetodit kohapeal katsetamiseks [30]:

- Mittepurustav katse, kus kontrollitakse kõigepealt materjali ning selle komponente, mõõdetakse ja hinnatakse katsetatavat pinda kahjustamata

- Osaline purustatav katse, mis põhjustab lokaalseid kahjustusi, kuid ei mõjuta katsetatava konstruktsiooni üldist seisukorda.
- Purustatav katse, kus katsetatav konstruktsioon nõrgestatakse või purustatakse

Olemasolevate betoonkonstruktsioonide uurimisel on vajalik hinnata tarindi mehaanilist tugevust. Kõige täpsema vastuse saab purustava katsetamisega, kuid antud meetod on kallid ja aeganõudev. Parim lahendus on katsetada betoonkonstruktsioone mittepurustava ja purustava katsetuste kombineerimisel. [31]

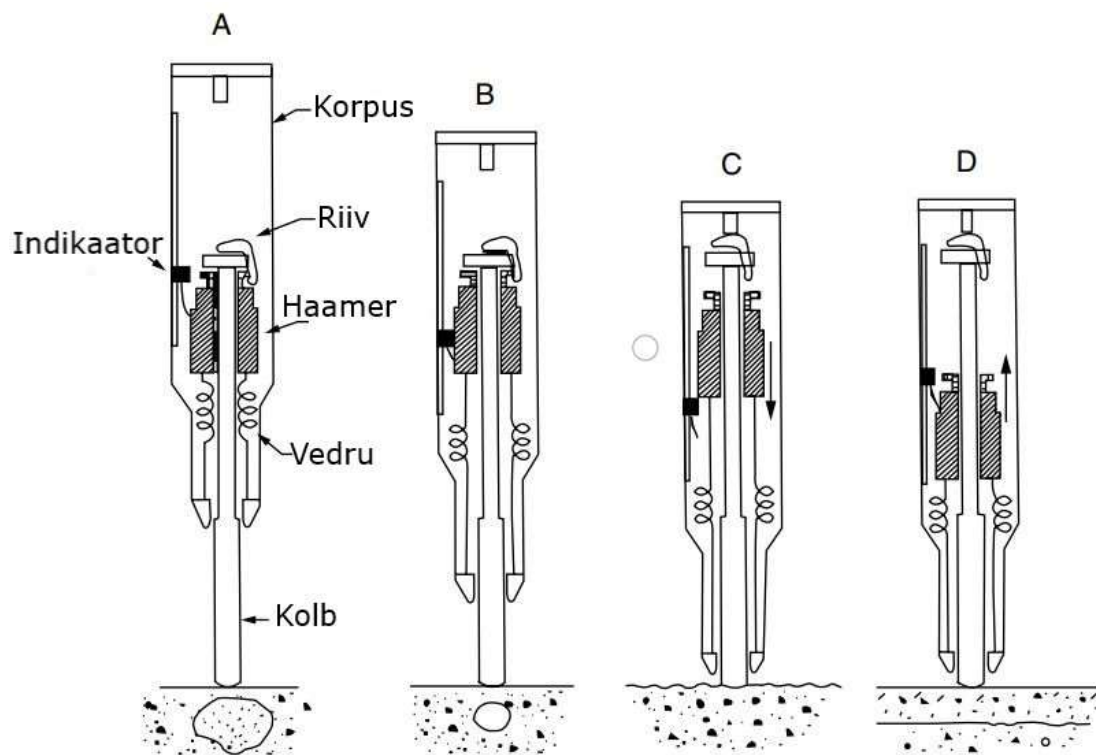
Mittepurustavad katsed on enamasti mõeldud uue betooni kvaliteedi kontrollimiseks, millega saab tuvastada betoonil defekte, kvaliteeti, tihendamist, pragusid, tühimikke, vastupidavust ja tugevust. Vanade betoonkonstruktsioonide mittepurustatavate katsete peamine eesmärk on saada teada betooni tugevus, kaitsekihi paksus, korrodeerumine ja karboniseerumissügavus. [32]

Eestis on standardiseeritud nelja tüüpi katsemeetodeid betooni tugevuse uurimiseks. Mittepurustavateks katseteks on pörkearvude meetod EVS-EN 12504-2:2012 [33] ja ultrahelipulsi kiiruse meetod EVS-EN 12504-4:2004 [34]. Osalise purustavaks katseks on standardiseeritud väljatõmbekatsed EVS-EN 12504-3:2005 [35]. Purustavaks katseteks on standardiseeritud puursüdamike võtmine EVS 12504-1:2019 [36] ja puursüdamike katsetamine EVS-EN 12390-3:2019 [37] standardi järgi, kus katsekehad standardile vastavas EVS-EN 12390-4 [38] katsemasinas purustatakse.

Olemasolevate hoonete mittepurustavaks betooni tugevuse hindamiseks on välja kujunenud põhilisteks katsetusviisideks ultrahelipulsi kiiruse mõõtmine ja Schmidt pörkevasara katsed [39][40][41] ning nende kombineerimine [31][42][43][44].

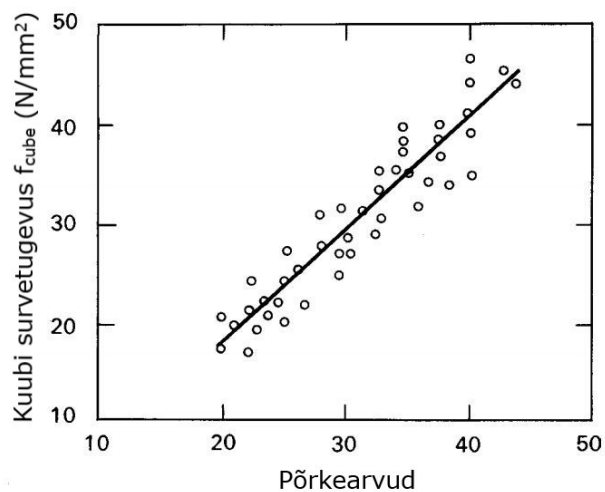
Käesolevas lõputöös uuriti Schmidt pörkevasara ja väljapuuritud katsekehade survetugevuste seost. Edaspidi on käsitletud Schmidt pörkevasarat mittepurustava seadmena kui Schmidt vasar, pörkevasar ja tagasilöögihaamrit.

Schmidt tagasilöögihaamer on peamiselt pinna kõvaduse testimiseks [32][45]. Pörkevasara tööpõhimõte seisneb tagasilöögipõhimõttel, kus kolb surutakse vastu katsetatavat pinda (joonis 1.6 A) ning haamri sees olev vedru venitatakse punkti (Joonis 1.6 B), kus riiv vabastatakse (joonis 1.6 C) ning metallkolb pörkab tagasi (joonis 1.6 D) [45].



Joonis 1.6 Schmidt'i pörkevasara põhimõtteline skeem [45]

Tagasilöögivahe mõõdetakse anduri abil ning edastatakse ekraanile. Tagasilöögiväärtus kuvatakse ekraanile tähisega R (mediaan) ja betooni vastav survetugevus F_{ck} (teoreetiline tugevus vastavalt Proceq teisenduskõverale). [46]



Joonis 1.7 Mittepurustav (Schmidt'i pörkearvude) ja purustava (kuubiku survetugevus) seos[29]

Haamrit saab kasutada nii horisontaalselt kui vertikaalselt, tingimusel, et haamer on testitava pinnaga risti. Kui katsetada haamriga vertikaalselt, siis peaks tulema tulemused väiksemad kui horisontaalselt, kuna pörkevasar töötab enda massiga. Suur pörkearv tähistab suure survetugevusega betooni (joonis 1.7). [32]

Tagasilöögihaamer on kiire lahendus betooni kõvaduse hindamiseks, kuid antud katsemetoodika tulemusi mõjutavad mitmed asjaolud [45]:

- a) Katsepinna siledus
- b) Katsekehade proovide suurus, kuju ja jäikus
- c) Katsekehade vanus
- d) Betooni pinna ja sisemuse niiskuse tingimused
- e) Jämeda täitematerjali tüüp
- f) Tsemendi tüüp
- g) Betoonpinna karboniseerumissügavus

Karboniseerumissügavus mõjutab pörkearvu määramist. Kui katsetatav pind on karboniseerunud 20mm sügavusele, võib pörkearvu tulemus olla 50% kõrgem kui karboniseerimata pinnal. [32]

2. METOODIKA

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on lammutamisele mineva hoone betoonkonstruktsioonide tugevusnäitajaid. Raudbetoonkonstruktsioonist katsekehad pärinesid Valga Priimetsa kooli hoonest, mis kuulus lammutamisele. Alljärgnev fotomaterjal on pildistatud autori poolt. Fotoseadmeks kasutati Samsung Galaxy S10+ kaamerat (kasutati 12MP ja 16MP objektive).

Uuritavad betoonkonstruktsioonid olid (sulgudes kuupäev, millal teostati objektil uuringuid):

- Trepimade, mis koosnes kahest osast, ülemine (peale valu) ning alumine osa (16.11.2020, temperatuur 4 °C)
- Raudbetoonala, mis on olnud ilmastikule eksponeeritud (23.11.2020, temperatuur 7 °C)
- Laepaneel (27.11.2020, temperatuur 4 °C)

Betoonkonstruktsioonide uuringuliigid:

- Visuaalne vaatlus
- Mittepurustavad katsed
- Karboniseerumise mõõtmine
- Purustavad katsed
- Külmakindluse katsed

2.1 Näidishoone - tüüpprojektiga koolihoone

Uuritud hoone kohta käivad ehitise üldandmed pärinevad Ehitisregistrist Tabelis 2.1 ja 2.2. [47]

Tabel 2.1 Uuritava hoone üldandmed Ehitisregistrist [47]

Ehitiseregistri kood	120279638
Katastriüksuse tunnus	85401:011:0120
Ehitise liik	Hoone
Ehitise nimetus	Koolimaja
Hoone peamine kasutamise otstarve	12632 Põhikooli või gümnaasiumi õppehoone
Ehitise koha-aadress	Valga maakond, Valga vald, Valga linn, J. Kuperjanovi tn 99
Esmase kasutuselevõtu aasta	1967
Ehitisealune pind (m ²)	2750
Suletud netopind (m ²)	3999

Tabel 2.1 järg

Korruste arv	3
Soojusvarustuse liik	Kaugküte

Tabel 2.2 Uuritava hoone konstruktsioonide ja materjalide andmed Ehitisregistrist [47]

Vundamendi liik	Madalvundament
Kande- ja jäigastavate konstruktsioonide materjal	Tellis
Välisseina välisviimistluse materjal	Keraamiline tellis
Välisseina liik	Tellis, väikeplakk
Katuste ja katuselagede kandva osa materjal	Monteeritav raudbetoon
Vahelagede kandva osa materjal	Monteeritav raudbetoon
Katusekatte materjal	Bituumen või PVC plaat või rullmaterjal

Programm Meetme „Koolivõrgu korrastamine” alategevus "Põhikoolivõrgu korrastamine perioodil 2014–2020" raames nähti ette Vabaduse 13, Valga asuva koolimaja renoveerimist ning koolimaja aadressil Kuperjanovi 99, Valga lammutamist. [48]

2.1.1 Ehitise iseloomustus enne lammutamist

Lammutamise vajaduse tingis eelkõige see, et nii suurt koolihoonet ei olnud tarvis ja muuks otstarbeks hoone ei sobinud – hoone oli eelkõige arhitektuurselt vananenud. Ehitise tarindite seisukord oli visuaalsel vaatlusel valdavalt rahuldav. Välisseintes oli teostatud kohtparandusi saadaolevatest materjalidest ehk kasutati teistsuguses värvitoonis silikaattelliseid (joonis 2.2). Samas sokkel oli tugevalt amortiseerunud (sõiduteeäärased alad soolkahjustustega). Majatagused välistrepid olid tugevalt amortiseerunud, majaesine trepp vajumismärkidega. Ei esinenud ühtegi nähtavat kahjustust kandvates konstruktsioonides.

Hoone vajas rekonstrueerimist. Õpilaste vähemuse tõttu otsustati Valga Vallavalitsuses viia kool väiksemale renoveeritud pinnale ning vana rekonstrueerimata kool lammutada. Uuringuid hakati teostama hetkel (16.11.2020), millal lammutustööde ettevõtja oli juba osa aknaid ning katuskonstruktsiooni eemaldanud (joonis 2.1).



Joonis 2.1 Viimased ülesvõtted lammutamisele kuuluvast objektist, vaade kirdest (16.11.2020)



Joonis 2.2 Erinevate materjalidega parandatud välisfassaad, pildistatud idakaarest (16.11.2020)

2.2 Uuritavad tarindid

Objektil teostati uuringuid lammutustööde ajal, kuivõrd sel ajal oli tarinditele kõige parem juurdepääs. Lammutuseks kasutati roomikekskavaatorit (joonis 2.3). Lammutustöödeks kasutati erinevaid lisaseadmeid purustamiseks (joonisel 2.4).



Joonis 2.3 Roomikekskavaator ning ehitusmasina lisaseadmed



Joonis 2.4 Lammutustöödeks kasutatavad haaratsid. Vasakpoolsemat kasutati suuremate konstruktsioonelementide eraldamiseks ja lammutamiseks ning parempoolset haaratsit kasutati konstruktsioonelementide lammutamiseks väiksemateks tükkideks

Lammutustööde teostajaga valiti koos piisava paksusega tarindid välja ning ekskavaatorijuht toimetas elemendid haaratsitega uuringualale. Uuringuala asus töötavast ehitusmasinast eemal, et oleks ohutus tagatud.

Uuringu eesmärgiks oli hinnata hoone betoontarindite seisukorda. Uuringu jaoks puuriti välja katsekehad trepimadest, mis koosnes kahest osast, raudbetoon talast ning saali katuslae paneelidest. Eelnevalt enne katsekehade väljapuurimist teostati pörkevasara katsed. Seejärel puuriti katsekehad teemantpuuriga välja ning hinnati karboniseerumist. Katsekehad toimetati laborisse, kus teostati lisauuringuid külmumisulamis katsed ning universaalpressi all tugevuskatsed, purustades katsekehad. Antud tulemid registreeriti ning analüüsiti.

2.2.1 Trepimademetek olukord enne katsetamist

Trepimade koosnes kahest osast, alumine kiht ning ülemine kiht (joonis 2.5). Ülemine kiht oli avatud väliskeskkonnale. Autor käsitleb edaspidi trepimade alumine kui trepi alumist betoonkonstruktsiooni osa (alumine made) ning trepimade ülemine kui trepi ülemist osa ehk pealmist pinda (ülemine made).





d)

Joonis 2.5 a) uuritav trepimade, b) trepimade alt (alumine made), c) trepimade külgvaade, d) trepimademe pealtvaade (ülemine made)

2.2.2 Raudbetoontala olukord enne katsetamist

Uuringus vaadeldi ning uuriti olemasolevat raudbetoontala, mis oli avatud väliskeskkonnale (joonis 2.6a).



Joonis 2.6 Fotod uuritavast raudbetoontalast: a) ehitusobjektidel enne eemaldamist, b) raudbetoontala ehitusobjektidel peale maha tõstmist, c) kaasavõetud tala osa

Konstruksioon saadi lammutustööde käigus kätte ühes tükis, kuid maha tõstmisel raudbetoontala alumise vöö osa betoonkaitsekihti purunes (joonis 2.6b). Talast puuriti katsekehad välja nii, et saaks toimetada ühe osa raudbetoontalast objektilt laborisse edasisteks toiminguteks (joonis 2.6c).

2.2.3 Raudbetoonplaatide olukord enne katsetamist

Lammutustööde käigus lammutati saali katus ning osad raudbetoonplaadid jäid kohati terveks. Raudbetoonplaat toimetati lammutusjäätmetest uuringualale ning elementidelt eemaldati SBS kiht uuringute jaoks.



Joonis 2.7 Monteeritavad raudbetoonplaadid

2.3 Uuringu meetodika

2.3.1 Visuaalne vaatlus

Visuaalsel vaatlusel hinnati betoontarindite seisukorda vastavalt autori poolt koostatud tabelile 2.3.

Tabel 2.3 Visuaalse vaatluse kokkuvõte

Jrk	Konstr. Nimetus	Ligi-kaudne vanus	Eeldatav valmistusviis	Avatud vaatlusele	Kahjustused	Hinne
1.	Näiteks: RB trepp	Nt: 10 aastat	Näiteks: 1) Monteeritav-monoliitne (tehases valatud ja kohapeal monolitiseeritud) 2) Monoliitne (koha peal valatud) 3) Monteeritav (tehases valatud)	Aluspind, pealispind, külg	Näiteks: RB Trepp on tugevalt amortiseerunud, terassarrus on nähtaval.	Vastavalt Jaan Miljani konstruktsiooni hindamise kuuepalli skaalale (hinded 0, 1, 2, 3, 4, ja 5) [49]

2.3.2 Mittepurustav katsetamine

Mittepurustav katse meetod - Schmidt'i pörkevasaraga

Vastavalt standardile EVS-EN 12504-2:2012 määrati betooni pörkearvud, kasutades vedruvasarat [33]. Pörkevasara mõõteseadmeks kasutati Digi Schmidt 2000.

„Pörkevasara tööpõhimõte on vedru jõul liikuma pandud mass lööb katsetamiseks ettenähtud konstruktsiooni või katsekeha pinnaga kontaktis olevale otsikule. Katsetulemuseks on pikkusühikutes väljendatud massi tagasipörke suurus.“ [33]

Pörkevasara katseid teostati puhastataval pinnal, pinnad puhastati harjaga ning teostati Schmidt'i pörkevasara katsed. Katsed, mis erinesid 20% lugemite suurusest rohkem kui 30% ei arvestatud. [33]

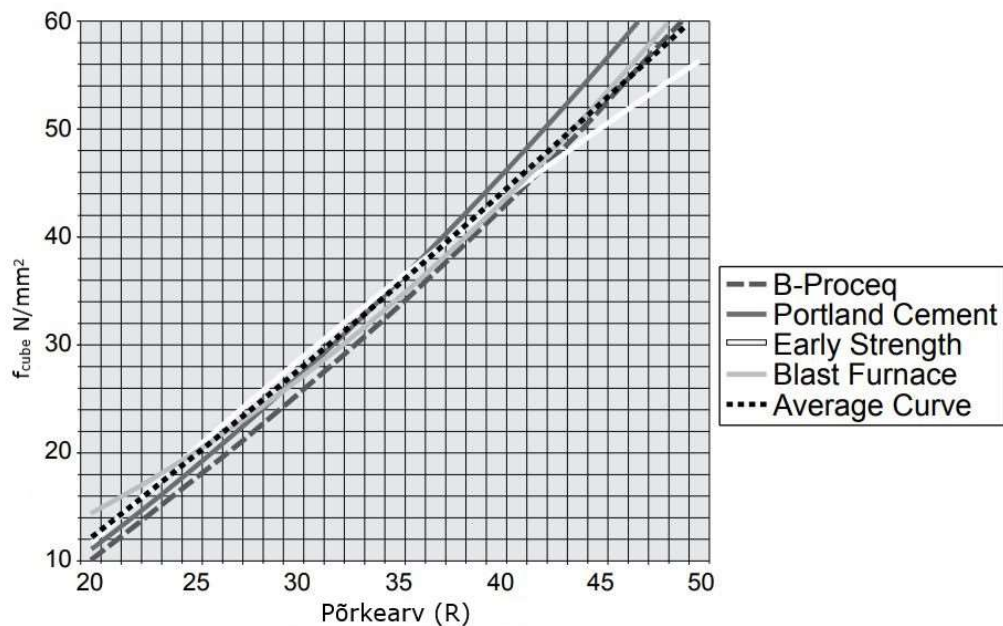
Igal uuritaval tarindil teostati vähemalt seitse kümne katselist tulemit. Antud tulemused grupeeriti vastavalt uuringutarindile. Tuleb võtta arvesse, et katsetatavad tarindid olid

kohati karboniseerunud. Vastavalt löökide pörkearvude tulemustele arvutati Schmidti pörkevasaraga teoreetilised tulemused vastavalt teisenduskõverale (joonis 2.8)

Vastavalt standardi EVS-EN 13791:2020 Lisa B [50] kohaselt saab hinnata betooni survetugevust pörkearvudega (tabel 2.4)(Standardi näide on võetud EN 13791:1:2006 Saksamaa rahvuslikus lisas esitatud meetodist). Pörkearvu ja survetugevuse vaheliseks seoseks peab olema täidetud järgmised tingimused: tegemist on normaalbetooniga ning karboniseerumine ei või ületada 5mm. [50]

Tabel 2.4 Pörkekaugusel põhinev pörkearv (tüüp R) ja sellega seotud standardi EN 206 kohased normaalbetooni survetugevusklassid [50]

Katsepiirkonna pörkearvude mediaan (X)	Standardi EN 206 survetugevusklassid
$30 \leq X < 33$	C8/15
$33 \leq X < 35$	C12/15
$35 \leq X < 38$	C16/20
$38 \leq X < 40$	C20/25
$40 \leq X < 43$	C25/30
$43 \leq X < 47$	C30/37
$47 \leq X < 49$	C35/45
$49 \leq X < 51$	C40/50
$51 \leq X < 53$	C45/55
$53 \leq X < 57$	C50/60
$57 \leq X < 60$	C55/67
$60 \leq X < 65$	C60/75
$65 \leq X < 69$	C70/85
$69 \leq X$	C80/95



Joonis 2.8 Digi-Schmidt teisenduskõver [46]

2.3.3 Katsekehade väljapuurimine

Vastavalt standardi EVS-EN 12504-1:2019 [36] kohaselt puuriti katsekehad objektile välja. Betoonkatsekehade väljapuurimisel kasutati teemantpuurimisest HILTI, DD 160 (230 V, 2200 W) ja kõvasulamist puuri läbimõõduga 82 mm. Teemantpuurimisest kasutamiseks kinnitati ankruga samale tarindile, kust katsekeha välja puuriti (joonis 2.9). Puurimiseks oli vaja elektrivoolu (230 V). Enne ankru kinnitamist oli vaja asukoht välja mõõta, puurida auk kinnitusankru sügavusele, puhastada auk tolmust ning seejärel paigaldada ankur. Ankru eesmärk on hoida statiiv paigal. Ankru kinnitati keermelatt statiivi jäigastamiseks mutriga. Ankru ja statiivi ühildamisel reguleeriti statiiv nelja reguleerimiskruviga paralleelseks tasapinnaga, seejärel kinnitati puurimisest. Katsekehade väljapuurimisel kasutati ohtralt vett, et vältida puuri ülekuumenemist. Puhas vesi objektile puudus ning tuli kasutada kümne liitrist veetoiturit.

Vastavalt standardile EVS-EN 12504-1:2019 [36] valiti puurimiseks välja asukoht, mis ei ohustaks kandekonstruktsiooni. Puurimise eesmärgiks oli saada ühe ankru raadiuses katsekeha. Puurimisel üritati vältida sarruse sattumist kärni. Puurimise saaduseks oli kärn (katsekeha), mis märgistati ning hoiustati suletud pakendis.



Joonis 2.9 Kärni puurimine: a) seadme kinnitamine, lisandus veel veetoitur, b) ja c) puurimise tulemus konstruktsioonis

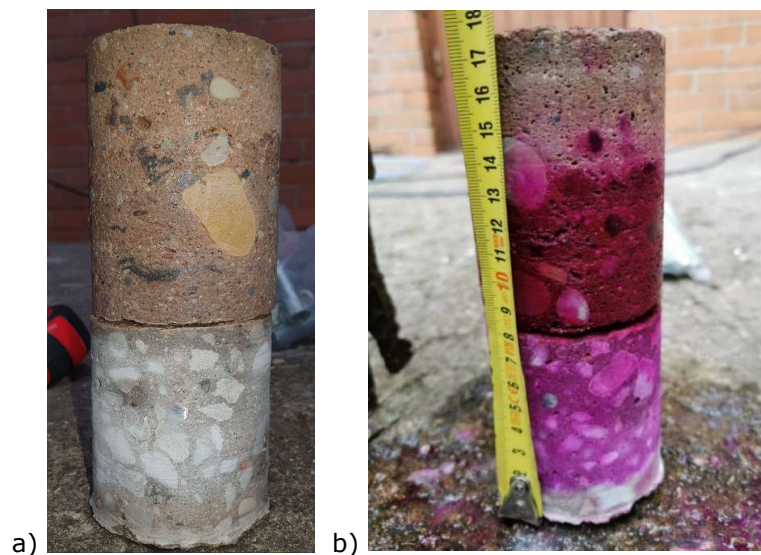
2.3.4 Karboniseerumissügavuse mõõtmine

Betooni karboniseerumissügavuse mõõtmise eesmärgiks on välja selgitada, kui sügavale konstruktsiooni välispinnast on betoon karboniseerunud. Karboniseerumise fronti eristati fenoolftaleiini lahusega.

Piserdades värskelt avatud betoonosale (välja puuritud silindritele, betooni killud vms) fenoolftaleiini muutub betoonipind punakaslillakaks. See tähendab, et betoonis on kõrge pH tase (aluseline keskkond ehk karboniseerimata osa, $\text{pH} > 9$), värvuse mitte muutumisel on betoonis madal pH tase (neutraalne keskkond ehk karboniseerunud osa, $\text{pH} < 8,2 \dots 9,8$). [9][11]

Karboniseerumissügavust mõõdeti joonlaua (30 cm) ja mõõdulindiga (3 m). Karboniseerumist mõõdeti kohe peale katsekehade väljapuurimist (joonis 2.10) ning osaliselt hiljem laboris (lihvides enne mõõtmist katsetatavat pinda). Mõõtmisel registreeriti kümne mõõttulemi keskmine.

Karboniseerumisega koos vaadeldi katsekehadel sarruse kaitsekihti. Mõõdeti karboniseerunud osast kuni armatuurini. Antud tulemused grupeeriti vastavalt uuringutarindile.



Joonis 2.10 a) Trepimademetest puuritud katsekehad, b) fenoolftaleiiniga kaetud katsekehad

2.4 Katsekehade purustav katsetamine

2.4.1 Katsekehade mõõtu lõikamine

Vastavalt standardile EVS-EN 12504-1:2019 teostati järgmiseid toiminguid [36]: Raudbetoontala üks osa, mis puuriti ning piigati lahti olevast talast, transporditi objektilt laborisse ning sellest lõigati välja külmaskindluseks kuus katsekeha mõõtmetega 150x150x50 mm ja survetugevuskatseks neli katsekeha mõõtmetega 100x100x100 mm. Lõikamiseks kasutati STIHL TS 800 ketaslõikurit (joonis 2.11).



Joonis 2.11 Märg lõikamine

Silinder katsekehad lõigati kuiv meetodil mõõtu ja sirgeks. Enne lõikamist ehitati raketis katsekehade paigal hoidmiseks. Üks osa katsekehi lõigati survekatseks mõõtu 1:1 suhtele, kus diameeter (d , mm) on võrdne kõrgusega (h , mm). Teine osa katsekehi lõigati kõrgusega 50 mm külmaskindluse katseks. Lõikamiseks kasutati Makita GA9020S ketaslõikurit (joonis 2.12).



Joonis 2.12 Kasutatud tarvikud lõikamiseks

2.4.2 Katsekehade mõõtmine

Vastavalt standardi EVS-EN 12390-3:2019 lisa B kohaselt mõõdeti kõik katsekehad peale sirgestamist nihikuga 1 mm täpsusega. Iga külj mõõdeti vähemalt kuus korda ning arvutati tulemite aritmeetiline keskmine. Surve- ja külmakindluse katseks arvutati katsetatav pindala A , mille mõõtmised on esitatud 1 mm² täpsusega. [37]

Tiheduse määramine

Vastavalt EVS-EN 12390-7:2019 [51] standardile teostati tiheduse määramine:

Tihedus arvutati katsekeha massi ja mahu määratud väärtuste alusel valemiga (2.1):

$$D = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

kus D on tihedus, mis põhineb katsekeha olekul ja mahu määramise meetodil, kg/m³

m on katsekeha mass katsetamisaegses olekus

V on antud katsemeetodil määratud katsekeha ruumala, m³.

Tihedus näidati 1,0 kg/m³ täpsusega

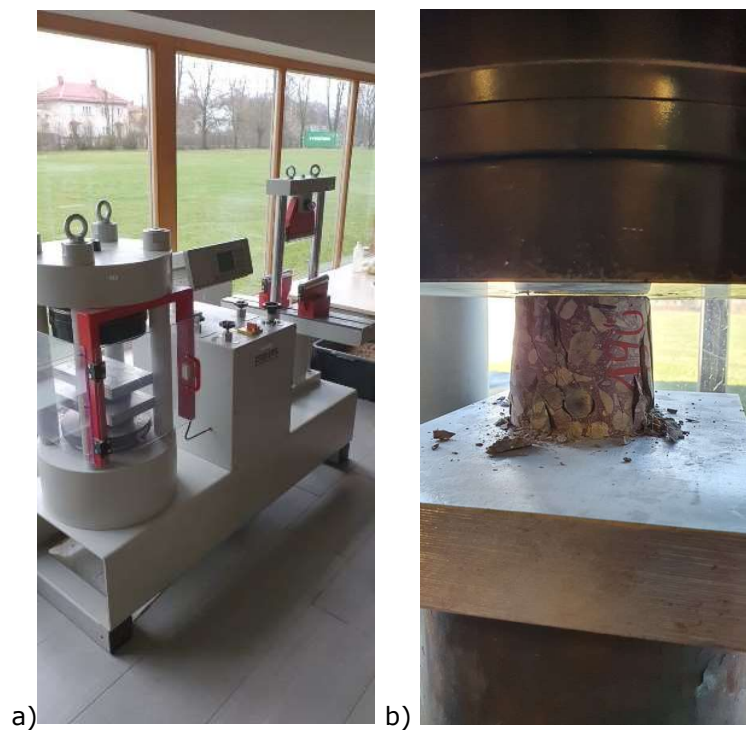
Katsetatava katsekehade massid (m) määrati KERN GAB kaaluga. Katsekehade massid mõõdeti 0,1 grammi täpsusega (joonis 2.13). Antud tulemused grupeeriti vastavalt uuringutarindile.



Joonis 2.13 Katsekeha kaalumine

2.4.3 Survekatse

Survekatsemasinaks kasutati masinat Form-Test Mega 7 (joonis 2.14).



Joonis 2.14 a) Survekatse seade, b) Purustatud katsekeha

Katseteks kasutati kuubik- ning silinderkatsekehi, mis vastasid EVS-EN 12504-1:2019 [36] nõuetele.

Katsetamistel jälgiti EVS-EN 12390-3:2019 [37] standardit: Katsemasina abiplaadid tsentreeriti. Katsekehad asetati alumise plaadi tsentrisse. Silinderkatsekehi koormati

kiirusega $1,0 \pm 0,2$ kN/s ning kuubik katsekehi $5,0 \pm 1,0$ kN/s. Kui maksimaalne koormusnäit ei suurenenud enam, suurendati konstantselt koormamise kiirust, kuni saavutati täielik purunemine katsekehal koos kõrgema kilonjuutoni (kN) näiduga. Kõrgeim kilonjuutoni näit registreeriti. Katsekehade purunemispilte võrreldi standardi joonistel 1-4 esitatuna. Vastavad tulemused analüüsiti ning kirjeldati tulemustes (R-rahuldav või MR – mitterahuldav).

Survekatse tulemused arvutati valemiga (2.2):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.2)$$

kus f_c on survetugevus, MPa (N/mm²)

F on suurim koormus, N;

A_c on katsekeha ristlõikepind, millele survejõud mõjub, arvutatud katsekeha mõõtmed vastavalt

Survetugevus esitati täpsusega 0,1 MPa (N/mm²)

Katsekeha kõrguse ja diameetri suhe oli 1, seega määrati konstruktsiooni tugevusklass kuubiku väärtustega vastavalt EVS-EN 206:2014+A2:2021 standardi tabeli 12 järgi.[52]

2.4.4 Armatuuri hindamine konstruktsioonis

Armatuuri kaitsekiht

Vastavalt EVS-EN 1992-1-1:2005+A1:2015+NA:2015 [53] on toodud välja minimaalsed kaitsekihtide väärtused vastavalt armatuuri keskkonnaklassile (vastavalt standardile EN 10080) tabelis 2.5:

Tabel 2.5 Terrassaruse minimaalsed kaitsekihid konstruktsioonides vastavalt keskkonnaklassidele [53]

Konstruktsiooniklass	Keskkonnaklass						
	X0	XC1	XC2/ XC3	XC4	XD1/XS2	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60

Raudbetoonis kaitseb betoon terast korrosiooni eest. Betooni kaitsekiht on kaugus betooni pinnale lähima armatuuri (kaasa arvatud põikiarmatuur, rangid ja

pinnaarmatuur) pinnast kuni betooni lähima pinnani. Mõõdistused teostati laboris ning määrati, kui suur on betooni kaitsekiht terasel [53]. Betoonikaitsekiht oleneb keskkonnatingimustest, kus minimaalne kaitsekiht määratakse vastavalt tabelile 2.5. Vastavalt projekteeritud kasutuseale määratakse konstruktsiooniklass vastavalt tabelile 2.6. Keskkonnaklassid määratakse vastavalt sellele, kuhu keskkonda konstruktsioon projekteeritakse (tabel 2.7).

Tabel 2.6 Projekteeritud kasutusead vastavalt klassidele vastavalt EVS-EN 1990:2002+NA:2002 [54]

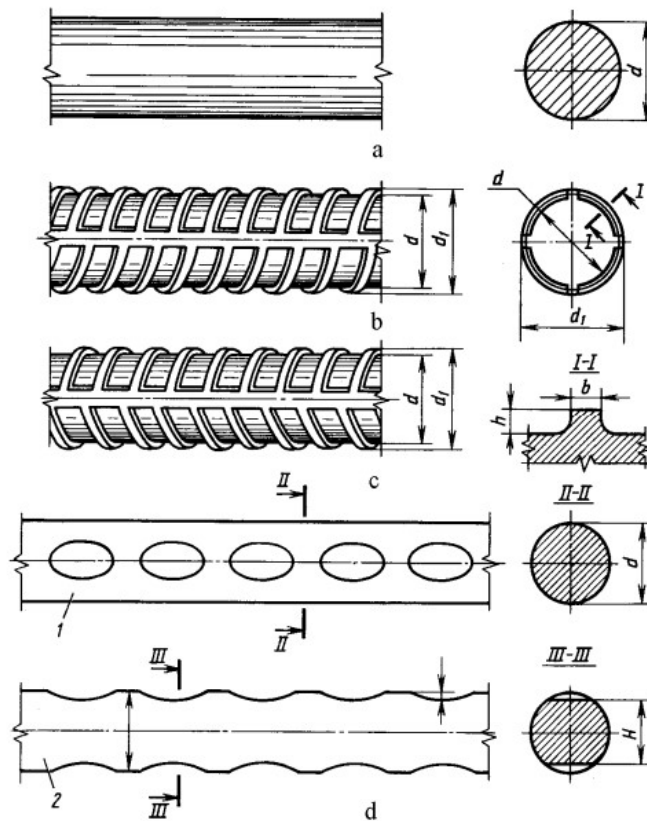
Projekteeritud kasutusea klassid	Projekteeritud kasutusiga
S1	10
S2	10-25
S3	15-30
S4	50
S5	100

Tabel 2.7 Keskkonnaklasside määramine vastavalt standardile EVS-EN 206:2014+A2:2021 [52]

Klassi tähis	Keskkonna kirjeldus	Keskkonnaklasside rakendamise näited
1. Korrosioonioht puudub		
X0	Betoon ei sisalda armatuuri ega tariraudu: kõik tingimused, välja arvatud need, mille puhul esineb külmumine/sulamine, kulumine või keemilised mõjurid. Betoon sisaldab armatuuri või tariraudu: väga kuiv	Betoon väga kuiva õhuga siseruumides
2. Karboniseerumisest põhjustatud korrosioon		
XC1	Kuiv või püsivalt märg	Betoon madala õhuniiskusega siseruumides. Pidevalt vee all olev betoon.
XC2	Märg, harva kuiv	Kaua veega kontaktis olevad betooni pinnad. Paljud vundamendid
XC3	Mõõdukalt niiske	Betoon mõõduka või kõrge õhuniiskusega siseruumides. Vihma eest kaitstud betoon välisõhus
XC4	Vaheldumisi märg ja kuiv	Veega kokkupuutuvad pinnad, mis ei kuulu klassi XC2
3. Kloriididest põhjustatud korrosioon		
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	Silla osad, millele langevad kloriide sisaldavad piisad Sillutised Autoparklad
4. Merevee kloriididest põhjustatud korrosioon		
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

Armatuuri klassi määramine

Olemasolevate katsekehade armatuuri klass valiti visuaalse vaatlemise teel vastavalt loengukonspektis „Raudbetoonkonstruktsioonid I“ toodud dotsent J. Valgur joonisele 2.15.



Joonis 2.15 Armatuuri liigid: a – silearmatuur, b – ribivardad A-II, c – ribivardad A III, d – muljutud pinnaga traadid Bp-I [55]

Armatuuri visuaalne hindamine

Peale purustavat katset hinnati terassarruse korrodeerumist katsekehades vastavalt tabelile 2.8:

Tabel 2.8 Terassarruse hindamine konstruktsioonis [56]

Terase olukord	Olukorra kirjeldus
10	Terve kaitsekiht on karboniseerunud, korrosioon puudub täielikult
9	Üksikud korrosioonitäpid kuni 3 mm

Tabel 2.8 järg

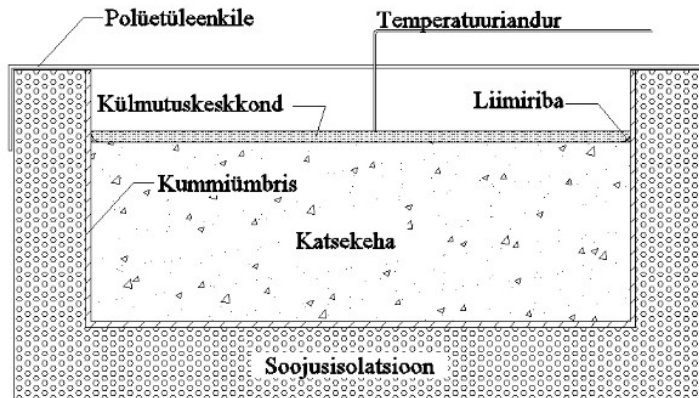
Terase olukord	Olukorra kirjeldus
8	Sageli esinevad korrosioonitäpid
7	Üksikud korrosioonilaigud üle 5 mm
6	Sageli esinevad korrosioonilaigud
5	Täielik korrosioon, kohati katkendlik
4	Täielik korrosioon
3	Täielik korrosioon, korrosiooniproduktide kasvu tunnusega
2	Täielik korrosioon, korrosiooniproduktid on tunginud betooni
1	Korrosiooniproduktide maht on kasvanud selliseks, et sellest tekkinud pinge tagajärjel on kaitsekihti tekkinud pragu
0	Korrosiooniproduktide kasv on saavutanud mahu, kus toimub kaitsekihi mahalöömine

2.4.5 Külmakindlus

Külmakindluse katse viidi läbi Beko HSA29530N (284 L) sügavkülmikus. Niiskus katsetatavas keskkonnas varieerus 50-80% RH.

Külmakindlust katsetamisel järgiti standardi EVS 814:2020 [18] põhimõtteid. Kahjuks puudus sügavkülmikus õhuringlus.

Vastavalt standardi EVS 814:2020 [18] meetodile jäljendas autor modifitseeritud katsekehade hoiustamist (joonis 2.16). Külmakindluse katsete jaoks lõi autor vahtpolüstüreeni sisse vastavalt katsekehade kujule süvendid. Kummiümbrise asemel kasutati polüetüleenkilet, mis paigaldati katsekehade ümber. Katsekeha ja polüetüleenkile ühildati elastse liimiga, et vältida külmutusaine äravoolamist. Kasutati KIILTOFIX Clear elastset liimi- ja tihendusmassi, mis talub kuni -40°C. Katsekeha asetati lõigatud vormi ning kaeti katsetatav pind külmutusainega. Katsekehad asetati külmikusse, kus need kaeti polüetüleenkilega, et vältida külmutusaine liigset aurustumist. Temperatuuriandur paigaldati polüetüleenkile ja katsekeha vahele nii, et andur ei asetseks külmutusaines.



Joonis 2.16 Külmutamis-sulatamiskatse korraldamise põhimõtteline skeem [18]

Katsakehade külmutuskeskkond valiti nende paiknemise eripäradest vastavalt standardi EVS 814:2020 tabelile 1 [18] järgnevalt:

Tabel 2.9 Külmakindluse keskkonnaklassid EVS 814:2020 tabel [18] koos autori täiendatud uuritavate tarinditega

Kesk-konnaklass	Keskkonna kirjeldus	Näited keskkonnaklasside rakendamise kohta	Uuritav tarind
XF1	Mõõdukalt veega küllastunud, ilma jäitevastase aineta	Vihma ja külma eest kaitsmata vertikaalsed betoonpinnad • Teest eemal asuvate hoonete fassaadid • Samade hoonete soklid • Kütmata hoonete sisemised betoontarindid • Käigutunnelid ja teised analoogsed konstruktsioonid	raudbetoonplaat, raudbetootala
XF4	Tugevasti veega küllastunud, jäitevastase aine või mereveega	Betoonpinnad, mis on avatud jäitevastaseid aineid sisaldavate pritsmete ja külma mõjule. Jäitevastaste ainete mõjule avatud tee- ja sillakatted, teekonstruktsioonide horisontaalsed ja kaldsed betoonpinnad. Pritsmete tsoonis asuvad külma mõjule avatud mererajatised, lisaks • Parkimisplatsid • Garaažide sissesõidu kaldteed • Välistrepid ja teised analoogsed konstruktsioonid	Trepimade alt ja ülevalt

Kuna uuritavate tarindite keskkonnaklassid on ainult XF1 ja XF4, siis tuleb vaadelda EVS 814:2020 standardi tabelit 2 [18] järgnevalt:

Tabel 2.10 Betooni külmakindluse normväärtused [18]

Kesk-konnaklass	Külma-kindluseklass	Kasutusiga, aastat	Külmakindluse vastavuskriteeriumid, kui on külmutuskeskkond (külmutusaine) on	
			Vesi	3 % NaCl lahus
XF 1	KK1-50	50	$S_{s6} \leq 0,50 \text{ kg/m}^2$ või $S_{s6} \leq 1,00 \text{ kg/m}^2$, kui S_{s6} / S_{28} on väiksem kui 2	-
	KK1-100	100	$S_{s6} \leq 0,20 \text{ kg/m}^2$ või $S_{s6} \leq 0,50 \text{ kg/m}^2$, kui S_{s6} / S_{28} on väiksem kui 2	-
XF4	KK4-50	50	-	$S_{s6} \leq 0,35 \text{ kg/m}^2$ või $S_{s6} \leq 0,70 \text{ kg/m}^2$, kui S_{s6} / S_{28} on väiksem kui 2
	KK4-100	100	-	$S_{s6} \leq 0,20 \text{ kg/m}^2$ või $S_{s6} \leq 0,50 \text{ kg/m}^2$, kui S_{s6} / S_{28} on väiksem kui 2

Katsekehad paigaldati üksteise peale külmikusse jättes vormide vahele minimaalselt kahe sentimeetrise vahe, tagades külmumise kõikides vormides olevatele katsekehadele (joonis 2.17 ja 2.18).

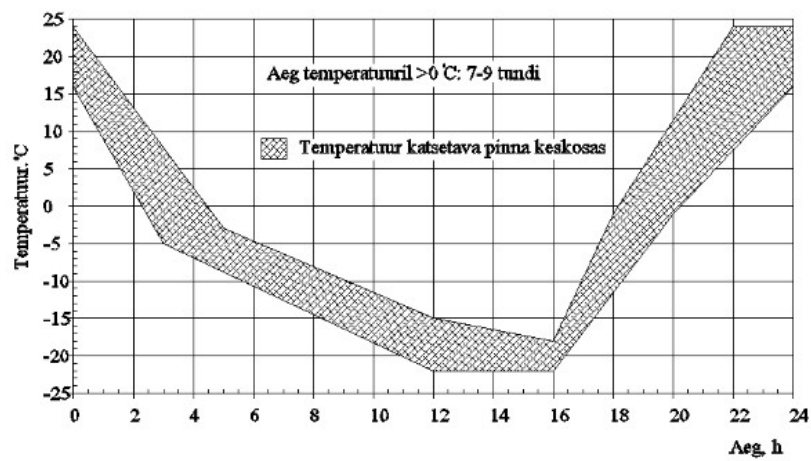


Joonis 2.17 Katsekehad vormides külmikus



Joonis 2.18 Katsekehad vormides külmikus, osaliselt kaetuna

Katsekehade külmumis-sulamis tsükleid jäljendas autor järgmist joonist 2.19:



Joonis 2.19 Külmutuskeskkonna temperatuuri-ajatsükkel katsetatava katsekeha pinnal [18]

Katse viidi läbi 28 järjestikul päeval. Iga 7 tsükli tagant kallati üleliigne vesi koos murenenud osadega anumasse, kraabiti harjaga lahtised osad katsetavalt pinnalt ning

asetati ahju 105 °C juurde 24 tunniks (joonis 2.20). Kasutati Memmert UF110 seeria ahju.



Joonis 2.20 Katsekehad alumiinium anumates ahjus

Anum kaaluti koos murenenud osadega. Vastavalt murenenud massile arvutati summaarne kogus (S_n) kilogrammides ruutmeetri kohta (kg/m^2) valemi (2.3) abil:

$$S_n = \frac{\sum M_n}{A} * 10, \quad (2.3)$$

kus $\sum M_n$ on murenenud materjali summaarne mass (massikadu) grammides pärast n arvu tsükleid, veapiiriga 0,1 gramm;

A on katsetatav pind, cm^2 , mis on arvutatud kummagi külje vähemalt kahest mõõtmistulemusest [18]

Veeimavuse määramine

Katsekehade veeimavus määrati vastavalt GOST 12730-73 [57] standardi järgi. Objektil kaasavõetud puurimispraagid, lõigatud tükkide ja survetugevusekatsete jääkidest teostati iga elemendi kohta veeimavuse määramine. Igal elemendil võeti katseteks 3 katsekeha. Katsekehade algkaal määrati 0,01g täpsusega, peale seda uputati katsekehad vees. Kui katsekehad olid veega kaetuna kolm ööpäeva teostati esimene veeimavuse määramine. Peale kaheksa tunni möödumist esimesest kaalumisest määrati teist korda ning peale 16 tunni möödumist teisest kaalumisest kolmas kord. Antud mõõtmiste eesmärk oli hinnata, kas katsekehad omastavad veel endasse vett. Konstantseks muutunud märg kaal fikseeriti ja katsekehad asetati ahju. Ahjus kuivatati

katsekehad 105 °C juures 24 tundi, seejärel teostati kuiv kaalumine ning arvutati veeimavus vastavalt valemile (2.4):

$$W = \frac{m_h - m_0}{m_0} * 100, \quad (2.4)$$

kus W – veeimavus (%)

m_h – veega küllastunud katsekeha kaal (g)

m_0 – kuivatatud katsekeha kaal (g)

3. KATSETE TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Visuaalne vaatlus

Visuaalsel vaatlusel hinnati betoontarindite seisukorda vastavalt autori poolt koostatud hindamistabelile (tabel 3.1).

Objekti aadress: Valga Priimetsa kool, Kuperjanovi 99, Valga

Tabel 3.1 Visuaalne vaatlus tarinditele

Jrk nr	Konstr. Nimetus	Ligi- kaudne vanus	Eeldatav valmistusviis	Avatud vaatlusele	Kahjustused	Hinne [49]
1.	Ülemine trepimademe osa (joonis 2.5a ja 2.5d)	53	Monoliitne (kohapeal)	Pealispind, 2 külge	Pealispind kahjustunud, külgesi kattev kiht maha pudenenud	5
2.	Alumine trepimademe osa (joonis 2.5b ja 2.5c)	53	Monoliitne (koha peal valatud)	Aluspind, külge	Alus pind kahjustusteta sile pind, avatäite kohal esines horisontaalne pragu	5
3.	Raudbetootala (joonis 2.6)	53	Monteeritav (tehases valatud)	Aluspind, küljed. Peale lahti monteerimist kõik küljed	Pealispind kohati amortiseerunud	5
4.	Raudbetoonplaat (joonis 2.7)	53	Monteeritav- monoliitne (tehases valatud ja kohapeal monolitiseeritud)	Vaadeldi peale lahti monteerimist kõiki külgi	Kahjustusi ei ilmnenud	5

Visuaalsel vaatlusel vaadati neid külgi tarinditel, mis olid avatud vaatlusele. Tarindite vanus oli eeldatavalt 53 aastat vastavalt Ehitusregistri [47] andmetele.

Ülemine trepimademe osa oli tugevalt kahjustunud, mille põhjuseks võib olla jääsulatamis soolade kasutamine talveperioodil, mis külmumis-sulamis tsüklitel hakkab lagundama pealispinda.

Alumise trepimademe seisukord oli visuaalsel vaatlusel hea. Tarindi aluspind oli sile, pragudeta. Avatäite kohal oli märgata horisontaalset pragu.

Raudbetootala esialgsel visuaalsel vaatlusel ei märgatud kahjustusi pindadel, mis olid vaadeldavad. Peale maha tõstmist purunes tala alumisest vööst betoonikaitsekiht ning samaaegselt sai ka visuaalselt hinnata tala pealispinda, mis oli avatud välismõjudele.

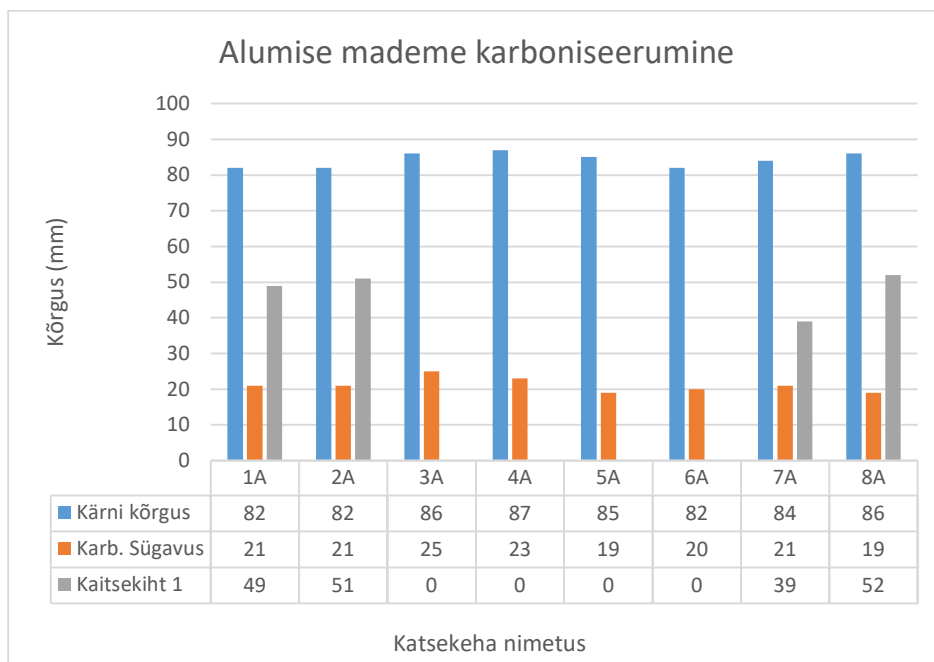
Raudbetoonplaadile teostati visuaalne hinnang peale saaliosa lammutamist. Antud plaadid saadi kätte enamvähem ühes tükis. Antud tarind oli kaetud SBS kihiga, peale pealiskihi eemaldamist teostati visuaalne vaatlus, kus ei esinenud ühtegi kahjustust.

3.2 Karboniseerumise katsete ja korrosiooni hindamise tulemused ja analüüs

3.2.1 Betooni karboniseerumissügavuse uuringu tulemused

Katsekehade betooni karboniseerumist hinnati peale kärnide väljapuurimist objektil kohapeal ning ka hiljem laboris, kus katsekeha enne mõõtmist lihviti. Vastavad mõõtmise tulemused on esitatud tulpdiaagrammidena, kus on näidatud väljapuuritud kärni kõrgus, karboniseerumise sügavus ning kaitsekihi paksust. Kaitsekiht 1, 2 ja 3 näitab armatuuri sisaldust kärnides ning nende betoonkaitsekihtide suurust. Betoonikaitsekiht ja karboniseerumissügavus arvutati kõigi katsekehade keskmisena.

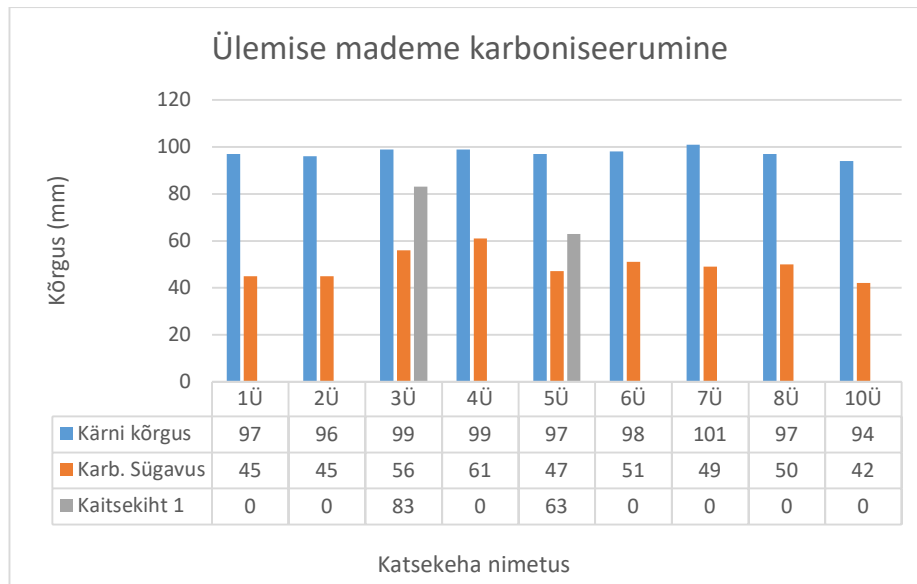
Trepimademe alumise osa betooni karboniseerumise uurimine



Joonis 3.1 Trepimademe alumise osa betooni karboniseerimine Näidatud katsekehade kõrgus, karboniseerumine ning kaitsekiht armatuurini.

Trepimademe alumise osa konstruktsiooni paksus, kust katsekehad välja puuriti, oli 80 millimeetrit (joonis 3.1). Elemendi betoonikaitsekiht oli keskmiselt 48 millimeetrit ning karboniseerumissügavus 21 millimeetrit. Väljapuuritud kaheksast katsekehast esines neljas katsekehas terasarmatuuri. Armatuur paiknes aluselises keskkonnas (karboniseerimata).

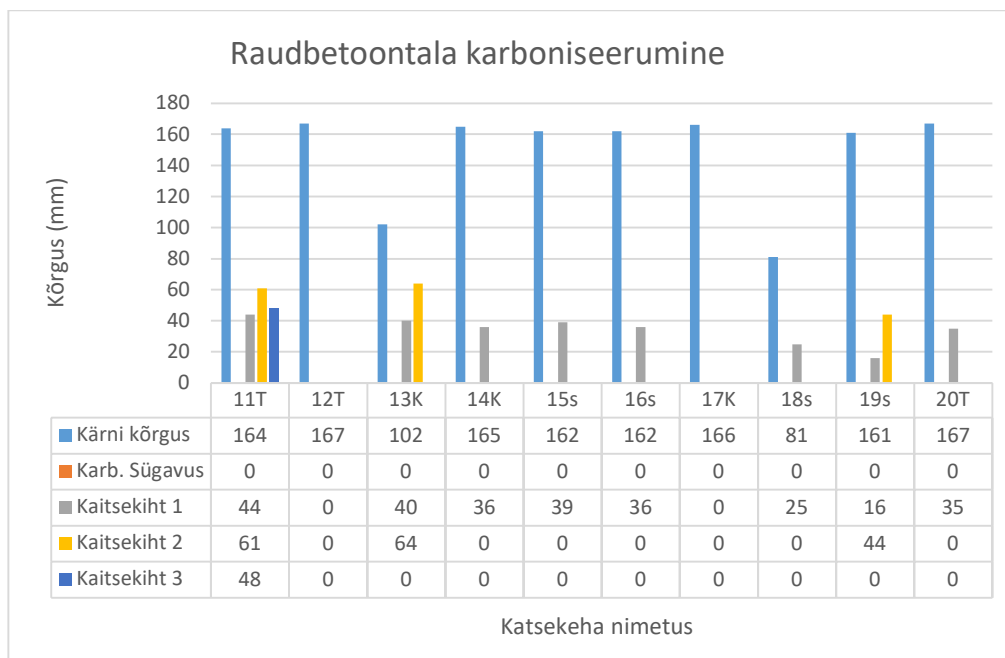
Trepimademe ülemise osa betooni karboniseerumise uurimine



Joonis 3.2 Trepimademe ülemise osa betooni karboniseerimine Näidatud katsekehade kõrgus, karboniseerumine ning kaitsekiht armatuurini.

Ülemise mademeosa konstruktsiooni paksus, kust katsekehad välja puuriti, oli 98 millimeetrit. Betoonikaitsekiht oli keskmiselt 73 millimeetrit ning karboniseerumissügavus oli 49,5 millimeetrit. Väljapuuritud üheksast katsekehast esines armatuuri kahes katsekehas. Armatuur paiknes aluselises keskkonnas (karboniseerimata).

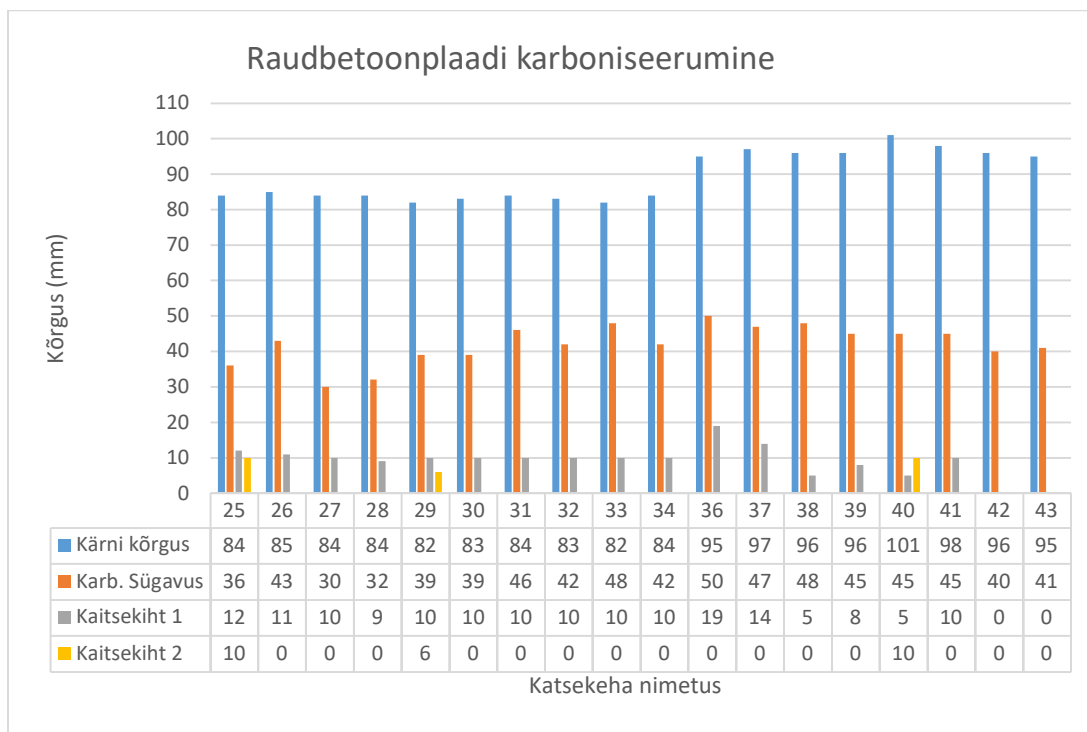
Raudbetoontala betooni karboniseerumise uurimine



Joonis 3.3 Raudbetoontala betooni karboniseerimine Näidatud katsekehade kõrgus, karboniseerumine ning kaitsekiht armatuurini.

Raudbetoontala laius (paksus), kust katsekehad välja puuriti, oli 160 millimeetrit. Betoonikaitsekiht oli keskmiselt 34 millimeetrit, kuid tarindi minimaalne kaitsekiht oli 19 millimeetrit (joonis 3.3). Raudbetoontalal karboniseerumine puudus. Väljapuuritud kümnest katsekehast esines armatuuri kaheksas katsekehas. Armatuur paiknes aluselises keskkonnas (karboniseerimata).

Raudbetoonplaadi betooni karboniseerumise uurimine



Joonis 3.4 Raudbetoonplaadi betooni karboniseerimine Näidatud katsekehade kõrgus, karboniseerumine ning kaitsekiht armatuurini.

Raudbetoonplaadi paksus, kust katsekehad välja puuriti, oli 90 millimeetrit. Betoonikaitsekiht oli keskmiselt 10 millimeetrit, kuid tarindi minimaalne kaitsekiht oli 5 millimeetrit (joonis 3.4). Raudbetoonplaadi karboniseerumissügavus oli keskmiselt 42 millimeetrit. Väljapuuritud kaheksateistkümnest katsekehast esines armatuuri kuueteistkümnes katsekehas. Armatuur paiknes neutraalses keskkonnas (karboniseerunud).

3.2.2 Armatuuri korrodeerumine

Peale purustavat katset uuriti katsekehades asetseva terase korrosiooni. Vastavalt katsekeha purunemisele lammutati terase ümbert ära betoonijääk hindamiseks.

Alumise trepimademe korrosiooni hindamine

Tabel 3.2 Alumise mademe korrosioon

Jrk nr	Katsekeha	Armatuuri paksus (mm)	Armatuuri klass 1	Armatuuri paksus (mm)	Armatuuri klass 2	Terase olukord	Keskkond
1.	1A	6	Silearmatuur	-	-	2	aluseline
2.	2A	6	Silearmatuur	6	Silearmatuur	2	aluseline
3.	7A	6	Silearmatuur	-	-	10	aluseline
4.	8A	6	Silearmatuur	-	-	7	aluseline



Joonis 3.5 Katsekehade 1A ja 2A sisemine korrosiooniuring

Purustavas katses purustati alumise mademe tarindi neli katsekeha, mis sisaldasid kõik silearmatuuri (tabel 3.2). Silearmatuuri läbimõõt oli 6 millimeetrit, mis asus aluselises keskkonnas. Vastavalt alumise mademe karboniseerumise joonisele 3.1 on näidatud armatuuri kaitsekiht, mis on keskmiselt 48 millimeetrit. Armatuur on pooleldi korrosiooni tunnusmärkidega, kus ülejäänud pool on passiveerinud (joonis 3.5). Korrosioon on eeldavalt tekkinud vähesest armatuuri puhastamisest.

Ülemise mademe korrosiooni hindamine

Tabel 3.3 Ülemise mademe korrosioon

Jrk nr	Katsekeha	Armatuuri paksus	Armatuuri klass 1	Terase olukord	Keskkond
1.	5Ü	6	Silearmatuur	3	aluseline



Joonis 3.6 Katsekeha 5Ü sisemine korrosiooniuring

Purustavas katses purustati viis katsekeha, millest ainult üks katsekeha sisaldas silearmatuuri (tabel 3.3). Silearmatuuri läbimõõt oli 6 millimeetrit, mis paiknes betooni aluselises keskkonnas. Vastavalt ülemise mademe karboniseerumise joonisele 3.2 on näidatud silearmatuuri kaitsekiht, mis oli keskmiselt 73 millimeetrit. Silearmatuur oli painutatud ning painde sisenurgas esines tugev korrosioon, ülejäänud osa oli passiveeriva kihi all (joonis 3.6). Teras korrosioon ei olnud veel tekitanud sisepingeid tarindis – praod, killustatus puudusid. Korrosioon on eeldavalt tekkinud vähesest armatuuri puhastamisest.

Raudbetoontala korrosiooni hindamine

Tabel 3.4 Raudbetoontala korrosioon

Jrk nr	Katsekeha	Armatuuri paksus	Armatuuri klass 1	Armatuuri paksus	Armatuuri klass 2	Terase olukord	Keskkond
1.	11A	14	Silearmatuur	-	-	7	aluseline
2.	11Ü	14	Silearmatuur	6	Silearmatuur	6	aluseline
3.	14A	6	Silearmatuur	-	-	2	aluseline
4.	15A	6	Silearmatuur	-	-	9	aluseline
5.	16A	6	Silearmatuur	-	-	10	aluseline
6.	19A	14	Silearmatuur	-	-	8	aluseline
7.	19Ü	14	Silearmatuur	-	-	2	aluseline
8.	20A	6	Silearmatuur	-	-	10	aluseline



Joonis 3.7 Katsekeha 19Ü sisemine korrosiooniuuring

Purustavas katsetuses purustati 15 katsekeha, milles kaheksas katsekehas esines armatuuri (tabel 3.4). Katsekehades esines 14 millimeetrist ja 6 millimeetrist läbimõõduga silearmatuuri, mis paiknesid betooni aluselises keskkonnas. Tarindi

betonikaitsekiht oli tarindis kõige madalamas kohas 16 millimeetrit vastavalt karboniseerumise joonisele 3.3. Konstruktsioonis olev armatuur oli kohati pooleldi korrodeerunud, kuid roostemahust tulenevalt sisepingete kasvust pragunemist ega killustamist ei esinenud (joonis 3.7). Korrosioon on eeldavalt tekkinud vähesest armatuuri puhastamisest.

Tabel 3.5 Raudbetoontala kuubikkatsekehade korrosioon

Jrk nr	Katsekeha	Armatuuri paksus	Armatuuri klass 1	Terase olukord	Keskkond
1.	K1	14	Silearmatuur	2	aluseline
2.	K2	6	Silearmatuur	9	aluseline
3.	K4	6	Silearmatuur	8	aluseline



Joonis 3.8 Katsekeha K1, K2 ja K4 sisemine korrosiooniuuring

Raudbetoontala tarindist lõigati välja neli 100 x 100 x 100 millimeetrit kuubikud, millest kolm katsekeha sisaldasid armatuuri (tabel 3.5). Kuue millimeetrine läbimõõduga silearmatuur oli passiivse kihi all, kus esines üksikuid roostelaike. Silearmatuur, 14 millimeetrise läbimõõduga, oli korrodeerumistunnustega (joonis 3.8). Korrosioon on eeldavalt tekkinud vähesest armatuuri puhastamisest.

Raudbetoonplaadi korrosiooni hindamine

Tabel 3.6 Raudbetoonplaadi korrosioon

Jrk nr	Katsekeha	Armatuuri paksus	Armatuuri klass 1	Armatuuri paksus	Armatuuri klass 2	Terase olukord	Keskkond
1.	25	6	Silearmatuur	10	A-II	4	neutraalne
2.	26	10	A-II	-	-	8	neutraalne
3.	27	10	A-II	-	-	6	neutraalne
4.	28	10	A-II	-	-	8	neutraalne
5.	29	6	Silearmatuur	10	A-II	2	neutraalne
6.	32	10	A-II	-	-	9	neutraalne
7.	37	10	A-II	-	-	3	neutraalne
8.	39	10	A-II	-	-	4	neutraalne
9.	40	6	Silearmatuur	10	A-II	4	neutraalne



Joonis 3.9 Katsekeha 29 sisemine korrosiooniuring

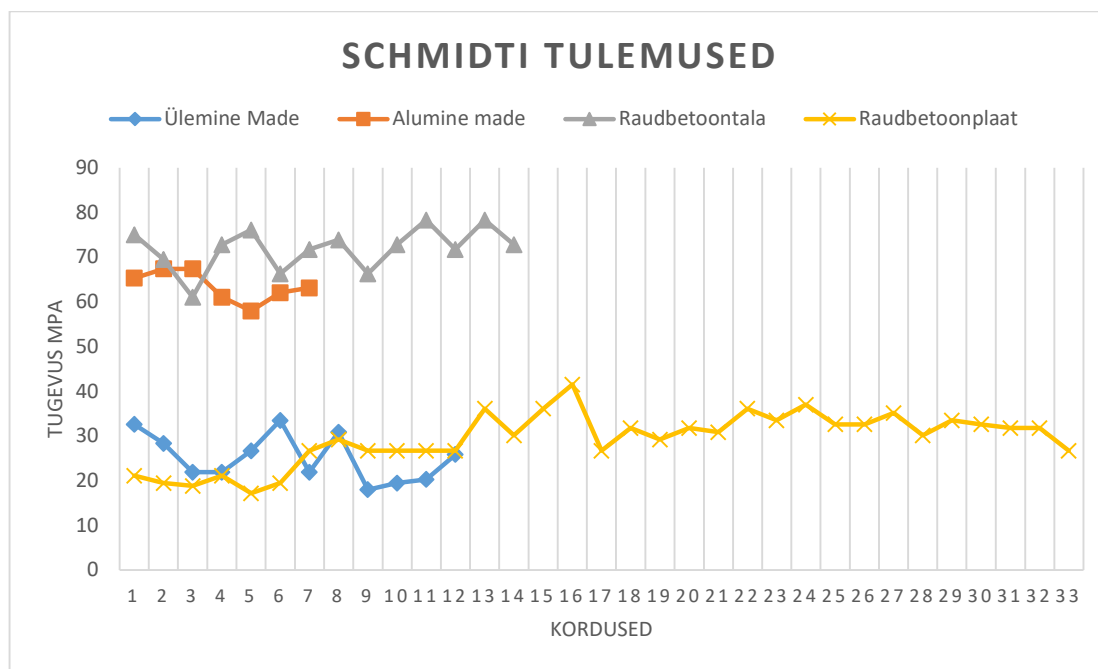
Purustavas katsetuses purustati 13 katsekeha, milles üheksas katsekehas esines armatuuri (tabel 3.6). Katsekehades esines 10 millimeetrise läbimõõduga A-II armatuuri ja 6 millimeetrise läbimõõduga silearmatuuri, mis paiknesid neutraalses keskkonnas ehk

karboniseerunud osas. Tarindi betoonikaitsekiht oli keskmiselt 10 millimeetrit vastavalt karboniseerumise joonisele 3.4. Konstruktsioonis olev armatuur oli kohati pooleldi korrodeerunud, kuid roostemahust tulenevalt sisepingete kasvust pragunemist ega killustamist ei esinenud katsekehadel ega ka tarindil (joonis 3.9).

3.3 Betooni survetugevusklassi määramine

3.3.1 Betooni survetugevusklassi määramine mittepurustaval meetodil

Igal elemendil teostati vähemalt 7 pörkevasara katset. Joonisel 3.10 on näidatud pörkevasara löökide arvud elemendi kohta ning arvutatud Schmidt'i pörkevasara teoreetiline tugevus vastavalt B-Proceq teisenduskõverale (MPa).



Joonis 3.10 Pörkevasara hinnanguline betooni survetugevus (MPa), vastavalt kasutatud teisenduskõverale B-Proceq

Schmidti pörkevasara löökide arvud varieerusid kõikidel tarindi osadel:

- a) Alumisel mademel sooritati seitse pörkevasara lööki, mille tugevuse tulemused varieerusid 58-67 MPa vahel, kus tarindi keskmiseks tugevuseks saadi 64 MPa.
- b) Ülemisel mademel sooritati 12 pörkevasara lööki, mille tugevuse tulemused varieerusid 18-34 MPa vahel, kus keskmiseks tugevuseks saadi 25 MPa.
- c) Raudbetoontalal sooritati 14 pörkevasara lööki, mille tugevuse tulemused varieerusid 61-78 MPa vahel, kus keskmiseks tugevuseks saadi 55 MPa.
- d) Laepaneelil sooritati 35 pörkevasara lööki, mille tugevuse tulemused varieerusid 17-42 MPa vahel, kus keskmiseks tugevuseks saadi 29 MPa.

Schmidti pörkevasara löökide järgi on märgata, et elementide minimaalne tulemuste varieeruvus on $\pm 4,5$ MPa (alumise made) ja kõige suurem tulemuste varieeruvus on $\pm 12,5$ MPa (laepaneel). Autor arvab, et Schmidti teoreetilise tugevuse hinnang ei ole aktsepteeritav, kuna varieeruvus on liiga suur.

Vastavalt EVS-EN 13791:2020 Lisa B tabel B.1 [50] (metoodikas tabel 2.4) kohaselt võrreldi betooni pörkearvude keskmist mediaani EN 206 survetugevusklassidega, kus:

- a) Alumisel mademel oli pörkearvude keskmine väärtus 51, seega alumise mademe konstruktsiooni survetugevusklass peaks olema teoreetiliselt C45/55.
- b) Ülemisel mademel oli pörkearvude keskmine väärtus 30, seega ülemise mademe konstruktsiooni survetugevusklass peaks olema teoreetiliselt C8/10.
- c) Raudbetoontalal oli pörkearvude keskmine väärtus 55, seega raudbetoontala tarindi survetugevusklass peaks olema teoreetiliselt C50/60.
- d) Raudbetoonplaadil oli pörkearvude keskmine väärtus 33, seega raudbetoonplaadi tarindi survetugevusklass peaks olema teoreetiliselt C12/15.

Eeldavalt on raudbetoontala teoreetiline survetugevus reaalne, kuna antud tarindis puudus karboniseerumine. Ülejäänutel tarindi osadel oli rohkem kui viis millimeetrit karboniseerumist, seega antud tulemusi ei saa võrrelda vastavalt standardi EVS-EN 13791 Lisa B tabel B.1-ga [50].

3.3.2 Betooni survetugevusklassi määramine purustaval meetodil

Survetugevusklassid määrati standardi EVS-EN 206:2014+A2:2021 tabeli 12 [52] järgi. Survetugevusklass määrati $f_{ck,cube}$ väärtuste põhjal, kuna silinderkatsekehade laiuse kõrguse suhe oli 1, siis saab võrrelda antud katsekehi kuubiku survetugevusega. Survetugevuskatseid teostati kokku 41 katset, kus iga tarindi grupile teostati minimaalselt neli survetugevuskatset. Katsekehade purunemispildid olid valdavalt mitte rahuldavad (Tabel L1.1 ja L1.2). Vastavalt standardile EVS-EN 13791:2020 on lubatud kasutada minimaalselt kolm kehtivate katsetulemustega katsekeha, kui on kasutatud kaudseid tulemusi (põrkearvud) [50].

Survetugevuse katsetulemuste tabelis on esitatud katsekeha tähis, armatuuri olemasolu katsekehas, tihedust (D), survetugevust ning kõikide katsetulemuste minimaalset (MIN), keskmist (AVG) ja maksimaalset tulemust (MAX).

Ülemine mademe survetugevuse katsetulemused

Tabel 3.7 Ülemise mademe survetugevuse katsetulemused

Jrk nr	Katsekeha	Armatuur	D (kg/m ³)	MPa (N/mm ²)	AVG	MIN	MAX
1.	1Ü	Ei	1979	9,2	14,0	11,4	16,7
2.	2Ü	Ei	1964	11,4			
3.	3Ü	Ei	1959	16,7			
4.	5Ü	Jah	2005	16,1			
5.	8Ü	Ei	1943	11,7			

Survetugevuseks lõigati välja 5 katsekeha, millest üks sisaldas armatuuri (5Ü). Viiest katsekehast üks katsekeha ei võetud arvesse, kuna katsekeha lõikuse tulemusel ei olnud pind tasane ning katse tulemust ei arvestatud (joonis 3.11). Survetugevuse katseks loeti nelja katsekeha tulemust (tabel 3.7). Nelja katsekeha survetugevuse keskmine tulemus saadi 14,0 MPa, kus minimaalne survetugevus katsetes oli 11,4 MPa ja maksimaalne 16,7 MPa. Kõigi katsetatavate katsekehade tihedus oli sarnane. Armatuuri sisaldus ühes katsekehas oli väiksem kui ühes katsetavas katsekehas, seega armatuuri sisaldus ei mõjutanud katsekehade tulemust. Vastavalt standardi EVS-EN 206:2014+A2:2021 tabelile 12 [52] saadi ülemise mademe elemendi betooni survetugevusklassiks C8/10.



Joonis 3.11 Form-test pressi vahel olev katsekeha 1Ü enne purustavat survekatsset. Selle katsekeha tulemust edasistes arvutustes ei kasutatud

Alumine mademe survetugevuse katsetulemused

Tabel 3.8 Alumine mademe survetugevuse katsetulemused

Jrk nr	Katsekeha	Armatuur	D (kg/m ³)	MPa (N/mm ²)	AVG	MIN	MAX
1.	1A	Jah	2282	27,7	26,2	25,5	27,7
2.	2A	Jah	2319	25,5			
3.	7A	Jah	2296	13,3			
4.	8A	Jah	2277	25,5			

Survetugevuseks lõigati välja neli katsekeha, millest kõik sisaldasid armatuuri. Neljast katsekehast üks katsekeha (7A) ei võetud arvesse, kuna katsekeha lõikuse tulemusel ei olnud pind tasane, vaid kumer. Antud katse tulemust ei arvestatud (joonis 3.12). Survetugevuse katseks loeti kolme katsekeha tulemust (tabel 3.8). Survetugevuse katsetulemustes saadi kolme katsekeha keskmiseks tulemuseks 26,2 MPa, kus minimaalne survetugevus oli 25,5 MPa ja maksimaalne survetugevus 27,7 MPa. Kõigi katsetatavate katsekehade tihedus oli sarnane ning survetugevusi võrreldes ei esinenud erinevusi. Vastavalt standardi EVS-EN 206:2014+A2:2021 tabelile 12 [52] saadi alumise mademe elemendi betooni survetugevusklassiks C20/25.



Joonis 3.12 Form-test pressi vahel olev katsekeha 7A enne purustavat survekatset. Selle katsekeha tulemust edasistes arvutustes ei kasutatud.

Raudbetoonplaadi survekatse katsetulemused

Tabel 3.9 Raudbetoonplaadi survetugevuse katsetulemused

Jrk nr	Katsekeha	Armatuur	D (kg/m ³)	MPa (N/mm ²)	AVG	MIN	MAX
1.	25	Jah	2333	14,0	16,9	11,5	26,0
2.	26	Jah	2318	12,7			
3.	27	Jah	2395	16,6			
4.	28	Jah	2323	18,7			
5.	29	Jah	2430	26,0			
6.	30	Ei	2346	21,4			
7.	32	Jah	2357	14,8			
8.	36	Ei	2315	11,5			
9.	37	Jah	2302	8,2			
10.	39	Jah	2268	13,9			
11.	40	Jah	2317	16,3			
12.	42	Ei	2233	17,9			
13.	43	Ei	2277	19,4			



Joonis 3.13 Form-test pressi vahel olev katsekeha 37 enne purustavat survekatset. Selle katsekeha tulemust edasistes arvutustes ei kasutatud.

Survetugevuseks lõigati välja 13 silinderkatsekeha, millest üheksa sisaldasid armatuuri (tabel 3.9). Ühe katsekeha tulemust ei võetud arvesse, kuna katsekeha lõikuse tulemusel ei olnud pind tasane, vaid killustatud (joonis 3.13). Survetugevuse katseks loeti kaheteistkümne katsekeha tulemust, mille survetugevuse keskmiseks väärtuseks saadi 16,9 MPa, kus minimaalne survetugevus oli 11,5 MPa ja maksimaalne survetugevus 26,0 MPa. Vaadates katsekehade tihedust survetugevustega, siis survetugevuse varieeruvus oli suurem kui tiheduse varieeruvus. Vaadates neid katsekehi, kus terassarrust ei esinenud, siis nende katsetulemused olid kohati suuremad kui terassarrust sisaldavad katsekehad, kuid katsetulemusi vaadates, ei saa öelda, et terasarmatuuri sisaldus mõjutab katsetulemusi. Vastavalt standardi EVS-EN 206:2014+A2:2021 tabelile 12 [52] saadi raudbetoonplaadi elemendi betooni survetugevusklassiks C12/15.

Raudbetoontala silinderkatsekehad ja kuubikkatsekehad

Tabel 3.10 Raudbetoontala silinderkatsekehade survetugevuse katsetulemused

Jrk nr	Katsekeha	Armatuur	D (kg/m ³)	MPa (N/mm ²)	AVG	MIN	MAX
1.	11A	Jah	2533	33,6	31,3	18,0	51,3
2.	11Ü	Jah	2539	18,0			
3.	12A	Ei	2437	30,9			
4.	12Ü	Ei	2387	33,3			
5.	14A	Jah	2399	15,3			
6.	15A	Jah	2446	21,8			
7.	15Ü	Ei	2378	16,1			
8.	16A	Jah	2397	25,2			
9.	16Ü	Ei	2387	24,7			
10.	17A	Ei	2372	27,9			
11.	17Ü	Ei	2372	26,0			
12.	19A	Jah	2461	27,7			
13.	19Ü	Jah	2522	51,3			
14.	20A	Jah	2471	48,2			
15.	20Ü	Ei	2507	38,3			

Tabel 3.11 Raudbetoontala kuubikkatsekehade survetugevuse katsetulemused

Jrk nr	Katsekeha	Armatuur	D (kg/m ³)	MPa (N/mm ²)	AVG	MIN	MAX
1.	K1	Jah	2467	58,8	49,0	34,2	58,8
2.	K2	Jah	2426	64,7			
3.	K3	Ei	2275	34,2			
4.	K4	Jah	2447	54,0			

Survetugevuseks lõigati välja 15 silinderkatsekeha, millest kaheksa sisaldasid armatuuri. Kahe katsekeha tulemust ei võetud arvesse, kuna katsekehade lõikuse tulemusel ei olnud pind tasane (joonis 3.14). Survetugevuse katseks loeti kolmeteistkümne katsekeha tulemust, mille survetugevuse keskmiseks väärtuseks oli 31,3 MPa, kus kõigi katsetulemuste miinimum oli 18,0 MPa ja maksimum väärtus 51,3 MPa (tabel 3.10). Vastavalt standardi EVS-EN 206:2014+A2:2021 tabelile 12 [52] saadi raudbetoontala tarindi betooni tugevusklassiks C25/30.

Antud elemendist lõigati välja neli kuubikut mõõdus 100 x 100 x 100 mm survetugevusekatseteks. Survetugevuskatsetustest võeti arvesse 3 kuubiku tulemus, kuna ühe katsekeha (K2) armatuur jäi surumisega pikisuunas. Kolmest katsekehast kaks sisaldasid armatuuri ning nende tulemus oli 54,0 ja 58,8 MPa (tabel 3.11). Armatuurita katsekeha tugevus tuli 34,2 MPa. Võttes arvesse, et betoon, mis sisaldab

armatuuri, tuleks betooni survetugevuseks C45/55, kuid kui võtta arvesse armatuurita betoon, tuleb betooni tugevuseks C25/30.



Joonis 3.14 Form-test pressi vahel olev katsekehad 14A ja 15Ü enne purustavat survekatset. Nende katsekehade tulemust arvutustes ei kasutatud.

Defektid betoonis

Ühe raudbetoonplaadi katsekeha väljapuurimisel täheldati, et monteeritaval raudbetoonplaadil on tootmisel sattunud konstruktsiooni ehitusprahti. Peale purustamist uuriti ehitusprahti lähemalt, mis kujunes välja loetavas kirjas paber (joonis 3.15).



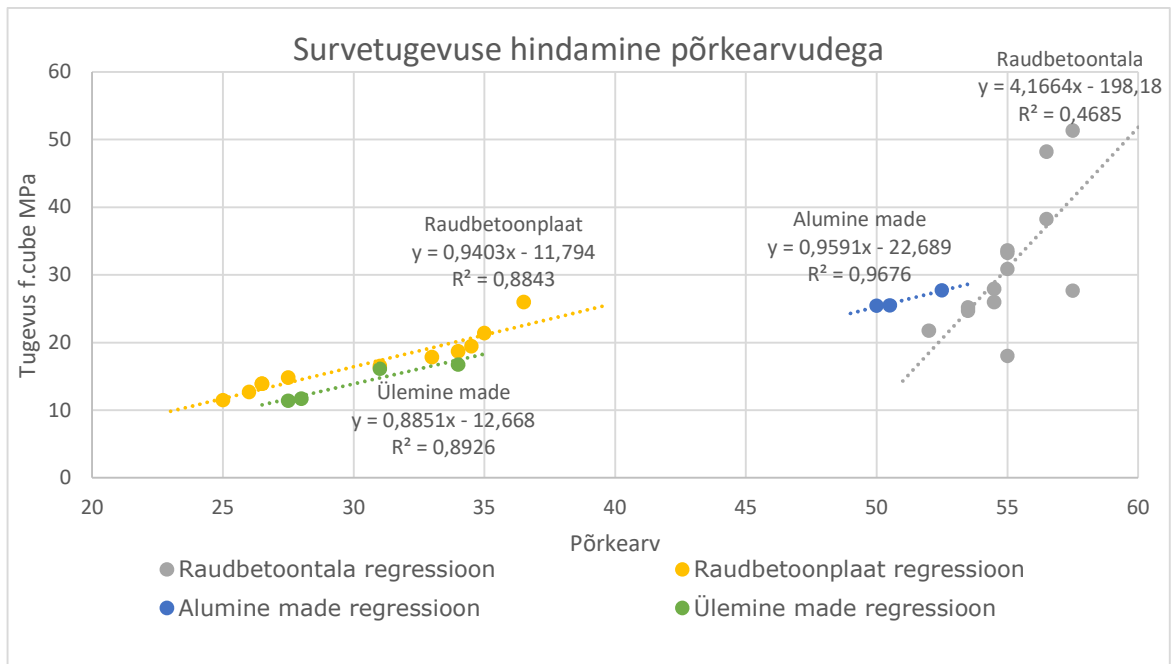
Joonis 3.15 Defektid betoonis

3.3.3 Mittepurustav katse ja purustava katse võrdlus

Mittepurustavate ja purustavate katsete tulemused koondati tabelisse, kus on märgata mittepurustava katsetel kooskõlas katsetulemusi purustaval katsel nõrgema tugevusega betoonil. Betooni tugevusklassi suurenemisel tekib märgatav vahe mittepurustava ja purustava katse vahel (tabel 3.12).

Tabel 3.12 Mittepurustava ja purustava katsete betooni survetugevusklassid

Tarind	Teoreetiline (Schmidt) tulemus	Purustav tulemus
Ülemine made	C8/10	C8/10
Alumine made	C45/55	C20/25
Raudbetootala	C50/60	C25/30
Raudbetoonplaat	C12/15	C12/15



Joonis 3.16 Pörkearvude võrdlus survetugevuse katsetega

Purustava katse tulemused (survetugevuskatsed) võrreldi mittepurustava katsetega (Schmidt'i pörkevasara arvudega). Joonisel 3.16 on näidatud katsetulemusi ning koostati regressioonitabel Exceli abil (tabel 3.13).

Tabel 3.13 Regressiooni tabel, N – katsetulemuste valim, SE – standarderror (standardhälve/ruutjuur N), R^2 – determinatsioonikordaja, p – olulise tõenäosus

Element	N	a	b	SE	R^2	p
Alumine made $y = 0,9591x - 22,689$	3	0,959	-22,689	5,105	0,968	0,115
Ülemine made $y = 0,8851x - 12,668$	4	0,885	-12,668	1,134	0,893	0,055
Raudbetoontala $y = 4,1664x - 198,18$	13	4,166	-198,18	7,440	0,469	0,010
Raudbetoonplaat $y = 0,9403x - 11,794$	12	0,940	-11,794	1,454	0,884	$5,4 \cdot 10^{-6}$

Regressiooni tabelis on näidatud nelja tarindielemendi seosemudelit purustava ja mittepurustava katsetulemuste vahel. Tabelis 3.13 on välja toodud kõigi tarindielementide tugevuste seosemudelite parameetrid, tähtsaim (p), kus alla 0,05 jäävad seosed on usaldusväärsed. Seega võib lugeda regressioonigraafikul raudbetoontala ja raudbetoonplaadi tugevuste seose mudeli usaldusväärseks. Raudbetoontalal on näha kahe katsekeha tulemust oluliselt allapoole trendijoont ning kahe tulemust üle trendijoont, mille põhjusel R^2 kahaneb võrreldes raudbetoonplaadiga. Statistiliselt oluliselt ei saa me vaadelda alumist ja ülemist madet, kuna katsekehade arv valimis on väike ja sellega seoses on mudel ebausaldusväärne.

3.4 Külmaskindluse katsed

3.4.1 Külmaskindluse tulemused

Külmaskindluse tsükleid viidi läbi 28 järjestikul päeval. Igast elemendi grupist katsetati neli katsekeha läbimõõduga 73 millimeetrit ning kõrgusega 50 ± 2 millimeetrit. Lisaks katsetati raudbetoontala grupist $150 \times 150 \times 50$ millimeetrist kuus katsekeha (joonis 3.17). Katsetamisel valgus külmutusaine polüetüleenkile ja katsekeha vahelt katsekeha alumisele horisontaalsele pinnale, seega peab kõikide katsekehade massikadu arvutades arvestama alumist ja ülemist katsekeha horisontaalset pindala. Iga 7 külmumis-sulamis tsükli tagant pühiti alumiinium anumasse murenenud osa, murenenud osa koos anumaga kuumutati üleliigne niiskus ahjus 105°C juures välja ning kaaluti koos anumaga. Viimasel, 28 külmumis-sulamis tsükli, eemaldati

katsekehadelt polüetüleenkile ja elastne liim ning vaadeldi, kas külgede pealt on ka tekkinud murenemisi (joonis 3.18). Kõik murenenud osad koguti kokku anumasse, kuivatati ning kaaluti.



Joonis 3.17 Katsekehad enne külmumis-sulamis tsükleid



Joonis 3.18 Katsekehad pärast külmumis-sulamis tsükleid

Tabel 3.14 Silinderkatsekehade 73Ø x 50 mm ($A = 83,71 \text{ cm}^2$) mõõtmatega katsekehade külmumis-sulamis katse massikao tulemus

Kesk-konna-klass	Katsekehad 73Øx50 mm	Jrk nr	Katse-keha	h (mm)	d (mm)	M (g)	D (kg/m ³)	Veeimavus (%)	Tsükkel 7 (g)	Tsükkel 14 (g)	Tsükkel 21 (g)	Tsükkel 28 (g)	ΣM (g)	$\Sigma S7-S28$ (kg/m ²)	keskmise ΣS (kg/m ²)
XF4	Alumine made	1.	3A	52	73	469,0	2155	7%	0,7	4,3	19,4	71,2	95,7	11,43	11,33
		2.	4A	51	73	471,2	2207		1,3	5,4	25,8	109,7	142,2	16,98	
		3.	5A	51	73	485,7	2275		1,7	1,5	2,0	12,2	17,3	2,07	
		4.	6A	52	73	490,6	2254		1,5	8,9	37,8	76,1	124,2	14,84	
	Keskmine:								1,3	5,0	21,3	67,3	94,8	11,33	
	Ülemine made	5.	4Ü	51	73	419,6	1966	9%	1,0	0,3	1,0	1,4	3,7	0,45	1,21
		6.	6Ü	51	73	416,1	1949		0,7	0,3	1,7	2,8	5,4	0,65	
		7.	7Ü	52	73	414,2	1903		1,2	0,6	2,9	7,9	12,6	1,51	
		8.	10Ü	51	73	420,4	1970		3,5	0,5	6,0	8,7	18,7	2,23	
	Keskmine:								1,6	0,4	2,9	5,2	10,1	1,21	
XF1	Raudbetoon-tala	9.	13A	51	73	544,7	2552	5%	0,2	0,4	0,3	3,3	4,2	0,51	0,23
		10.	13Ü	53	73	545,4	2459		0,1	0,1	0,5	0,6	1,3	0,16	
		11.	14Ü	52	73	517,4	2377		0,2	0,2	0,5	0,8	1,6	0,19	
		12.	18	48	73	475,5	2367		0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,07	
	Keskmine:								0,1	0,2	0,3	1,2	1,9	0,23	
	Raudbetoon-plaat	13.	31	50	73	495,2	2366	6%	0,6	0,3	0,3	16,2	17,4	2,08	2,34
		14.	33	52	73	506,0	2325		0,2	0,2	1,3	1,5	3,1	0,37	
		15.	38	52	73	484,3	2225		0,4	1,0	1,0	2,9	5,2	0,62	
		16.	41	52	73	495,7	2278		0,1	1,7	15,8	35,0	52,6	6,29	
	Keskmine:								0,3	0,8	4,6	13,9	19,6	2,34	

Tabel 3.15 Raudbetoontala 150 x 150 x 50 mm mõõtmatega katsekehade külmumis-sulamis katse massikao tulemus

Tabel 3.13 Raudbetoontala 150 x 150 x 50 mm mooditeta katsekehade raamimis sulamis katse massikao tulemus																	
Kesk-konna-klass	Katsekeha 73Øx50 mm	Jrk nr	Katse keha	a (mm)	b (mm)	h (mm)	M (g)	A (cm²)	D (kg/m³)	Vee-Imavus (%)	Tsükkel 7 (g)	Tsükkel 14 (g)	Tsükkel 21 (g)	Tsükkel 28 (g)	ΣM (g)	ΣS7-S28 (kg/m²)	Kesk-mine ΣS (kg/m²)
XF1	Raudbetoontala	17.	S1	149	151	52	2989,2	450	2555	5%	0,6	0,0	0,3	0,6	1,5	0,03	0,05
		18.	S2	151	148	54	2836,3	447	2350		0,9	0,2	0,1	0,9	2,0	0,05	
		19.	S3	150	149	50	2713,9	447	2429		0,5	0,2	0,2	0,1	1,0	0,02	
		20.	S4	152	150	55	3339,2	456	2663		0,8	0,0	0,1	0,2	1,1	0,03	
		21.	S5	149	150	55	2943,6	447	2395		3,9	0,2	0,5	0,8	5,4	0,12	
		22.	S6	151	149	55	2959,7	450	2392		0,7	0,2	1,1	0,8	2,8	0,06	
										Kesk-mine:	1,20	0,14	0,39	0,56	2,30	0,05	

Tabelis 3.14 ja 3.15 on näidatud katsekeha keskkonnaklass, katsetava katsekeha mõõtmed, järjekorranumber (jrk), Ristkülikkatsekehade külgede pikkused (*a* ja *b*), silinderkatsekehadel diameeter (*d*), kõrgus (*h*), katsekehade kaal (mass), pindala kokku ülevat ja alt (*A* cm²) tihedus (*D*), tsükliid (7 kuni 28), summaarne katsekehade mass (Σ*M*), summaarne massikadu vastavalt valemile 2.3 (Σ*S7-S28*) ning elemendi keskmine massikadu 28 tsükli järel.

Elementide veeimavus

Tabelis 3.16 on määratud elementide veeimavus vastavalt valemile 2.4, kus A1-A3 on alumise mademe elemendi katsekehad, Ü1-Ü3 on ülemise mademe elemendi katsekehad, T1-T3 raudbetoontala elemendi katsekehad ja P1-P3 raudbetoonplaadi katsekehad. M_0 on elemendi kuivatatud kaal, m_h on elemendi märgkaal ning W on veeimavus protsentides. Kõikide elementide katsekehade keskmine määrati veeimavuse leidmiseks. Alumise mademe veeimavus on 7%, ülemise mademe veeimavus on 9%, raudbetoontala veeimavus on 5% ning raudbetoonplaadi veeimavus on 6%.

Tabel 3.16 Elementide veeimavus määramine

Jrk nr	Katsekeha	m_0	m_h	W	Keskmine
1.	A1	69,59	74,7	7%	7%
2.	A2	83,21	89,7	8%	
3.	A3	94,70	100,7	6%	
4.	Ü1	172,78	189,7	10%	9%
5.	Ü2	181,55	195,9	8%	
6.	Ü3	111,82	121,7	9%	
7.	T1	522,75	545,2	4%	5%
8.	T2	359,97	380,2	6%	
9.	T3	452,50	468,8	4%	
10.	P1	705,00	747,2	6%	6%
11.	P2	157,08	168,0	7%	
12.	P3	90,10	95,8	6%	

Alumine made

Alumise mademe massikaod hakkasid tekkima katsekehadel seitsmendal tsüklil, kus katsekehade keskmine massikadu oli 1,3 grammi. Peale 14 külmumis-sulamis tsükli tõusis 3 katsekehal massikadu märgatavalt. 21 külmumis-sulamistsüklil oli märgata, et kolmel katsekehal oli külmumis-sulamistsüklite tagajärjel tõusnud massikadu pea 4-5 korda. Viimasel, 28 külmumis-sulamistsüklil oli massikadu märgatavalt suur kõigil katsekehadel eelneva tsükliga võrreldes. Peale katsekehade lahti monteerimist pragunes ning purunes täielikult katsekeha 6A (joonis 3.19). Antud elemendi seerias oli kõige vastupidavam katsekeha 5A, mille massikadu oli 2,07 kg/m² kohta, kui teisel kolmel katsekehal varieerus massikadu 11,43-16,98 kg/m² vahemikus.

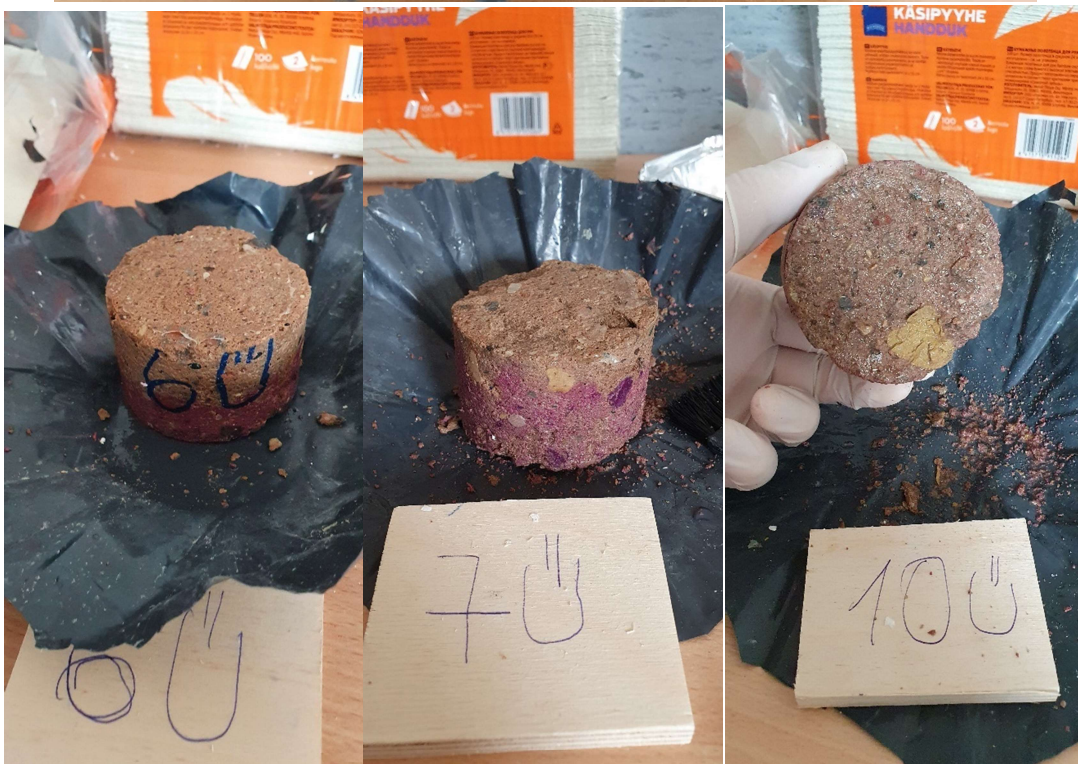


Joonis 3.19 Katsekehad 3A, 4A, 5A ja 6A pildid peale 28 külmumis-sulamis tsüklilt

Katsekehadel 3A ja 4A on märgatavalt suured alumise horisontaalse pinna murenemisi märgata. Joonisel 3.19 on näidatud 6A purunemispilte lahti monteerimisest. Katsekeha 6A lahti monteerimisest tulenevaid murenenud osi ei kuivatatud ahjus.

Ülemine made

Massikaod hakkasid tekkima katsekehadel seitsmendal tsüklil, kus katsekehade keskmine massikadu oli 1,6 grammi. Peale 14 külmumis-sulamis tsüklit vähenes kõigil katsekehadel massikadu. 21 külmumis-sulamistsüklil oli märgata 7Ü ja 10Ü katsekehade suuremat massikadu kui 4Ü ja 6Ü katsekehadel. Viimasel, 28 külmumis-sulamistsüklil oli massikadu märgatavalt suur kõigil katsekehadel eelneva tsükliga võrreldes. Peale katsekehade lahti monteerimist külgede vaatlemisel ei esinenud pragunemisi ega murenemisi. Antud elemendi seerias oli kõige vastupidavam katsekeha 4Ü, mille massikadu oli 0,45 kg/m² kohta, kui teisel kolmel katsekehal varieerus massikadu 0,65-2,23 kg/m² vahemikus. Joonisel 3.20 on näidatud kõigi katsekehade olukord peale 28 tsüklit. 10Ü katsekehal tekkis massikadu täitematerjali purunemisest.



Joonis 3.20 Katsekehad 4Ü, 6Ü, 7Ü ja 10Ü pildid peale 28 külmumis-sulamis tsüklilt

Raudbetoontala

Massikaod hakkasid tekkima katsekehadel seitsmendal tsüklil, kus katsekehade keskmine massikadu oli 0,1 grammi. Peale 14 külmumis-sulamis tsükli oli kolmel katsekehal murenemine sama, mis seitsmendal tsüklil. Katsekeha 13A kahekordistus murenemine. Peale 21 tsükli oli märgata katsekehadel 13Ü ja 14Ü massikao suurenemist, katsekehal 18 oli massikadu konstantselt sama ning 13A katsekehal vähenes massikadu.

Viimasel, 28 külmumis-sulamistsüklil oli massikadu märgatavalt suur 13A katsekehal eelneva tsükliga võrreldes. Peale katsekehade lahti monteerimist külgede vaatlemisel ei esinenud pragunemisi ega murenemisi. Antud elemendi seerias oli kõige vastupidavam katsekeha 18, mille massikadu oli 0,07 kg/m² kohta, kui teisel kolmel katsekehal varieerus massikadu 0,16-0,51 kg/m² vahemikus. Silinderkatsekehade keskmine massikadu peale 28 tsükli oli 0,23 kg/m², mis on väiksem kui 0,50 kg/m² ehk sobib KK1-50 külmakindluse klassi.

Raudbetoontala 150x150x50 mm katsekehade keskmine massikadu oli 0,05 kg/m² kohta, mis on väiksem kui 0,20 kg/m² ehk sobib KK1-100 külmakindluse klassi. Kõige vastupidavamad katsekehad külmakindluse suhtes olid S3 ja S4, kus murenemisi praktiliselt ei toimunud.

Raudbetoonplaat

Massikaod hakkasid tekkima katsekehadel seitsmendal tsüklil, kus katsekehade keskmine massikadu oli 0,3 grammi. Peale 14 külmumis-sulamis tsükli tõusis katsekehadel 38 ja 41 massikadu märgatavalt, samas katsekehal 33 jäi massikadu samaks ning katsekehal 31 vähenes pea poole võrra massikadu. 21 külmumis-sulamistsüklil oli katsekehadel 31 ja 38 massikadu sama, mis eelneva tsükliga. Katsekehal 41 oli märgata 14 kordset massikadu eelmise tsükliga võrreldes.

Viimasel, 28 külmumis-sulamistsüklil oli massikadu märgatavalt suur kolmel katsekehadel 31, 38 ja 41 eelneva tsükliga võrreldes, katsekehal 33 jäi murenemine eelmise tsükliga peaaegu võrdseks. Peale katsekehade lahti monteerimist pragunes ning purunes täielikult katsekeha 41. Antud elemendi seerias oli kõige vastupidavam katsekeha 33 ja 38, mille massikaod jäid vahemikku 0,37–0,62 kg/m², kui teisel kahel katsekehal varieerus massikadu 2,08-6,29 kg/m² vahemikus.



Joonis 3.21 Katsekeha 41 lahti monteerimine peale 28 külmumis-sulamis tsükli

Joonisel 3.21 on näidatud katsekeha 41 lahti monteerimist, kus peale katsekeha lahti monteerimist, oli märgata külgedel pragusid. Antud katsekeha purunes peale katsekeha kätega mudimist. Katsekeha 41 lahti monteerimisest tulenevaid murenenu osi ei kuivatatud ahjus.

3.4.2 Külumiskindluse kokkuvõte

Külmakindluse katsed viidi läbi koduseks kasutamiseks mõeldud sügavkülmikus, kus katsekehi külmutati keskmisel $-20,30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Külumine toimus 28 tsüklil keskmiselt 11,25 tundi ning sulatati 12,50 tundi.

Tabel 3.17 Tarindielementide keskmised massikaod tsüklite kaupa

Element	S7 (kg/m ²)	S14 (kg/m ²)	S21 (kg/m ²)	S28 (kg/m ²)	ΣS (kg/m ²)
Alumine made	0,15	0,60	2,54	8,04	11,33
Ülemine made	0,19	0,05	0,35	0,62	1,21
Raudbetoonplaat	0,03	0,10	0,55	1,66	2,34
Raudbetootala silinder	0,02	0,03	0,04	0,15	0,23
Raudbetootala ristkülik	0,03	0,00	0,01	0,01	0,05

Tabelis 3.17 on näidatud elementide keskmised massikaod seitsme tsükli kaupa. Ülemise ja alumise mademe silinderkatsekehad, kus kasutati külmutusaineks NaCl soolalahust, oli märgata massikadu esimese seitsmenda tsükliseerial. Raudbetoonplaadi silinderkatsekehad, kus kasutati destilleeritud vett, oli märgata katsekehade massikadu suurenemist alates 14 tsüklist. Raudbetootala silinder- ja ristkülikkatsekehade massikadu peaks olema võrdväärne, kuid on märgata silinderkatsekehades erinevust, kus massikadu on enamjaolt iga tsüklite seeriade tagant suurem kui ristkülikkatsekehadel. Summaarne massikadu silinderkatsekehadel oli pea neli korda suurem kui ristkülikkatsekehadel.

Antud katsest võib järeldada, et Alumine ja Ülemine made ei vasta KK4 keskkonnaklassi nõuetele. Raudbetoonplaadi katsekehad pidasid vastu 14 tsüklile, kuid peale 21 tsükli hakkas toimuma suur massikadu, seega antud element ei sobi KK1 keskkonda. Raudbetootala silinder katsekehad sobivad KK1-50 külmakindluseklassi (massikadu väiksem kui $0,50\text{ kg/m}^2$), kuid ristkülikkatsekehad sobivad KK1-100 külmakindluseklassi (massikadu väiksem kui $0,20\text{ kg/m}^2$).

3.5 Katsetulemuste järelused

Kõik katsetulemused on esitatud kokkuvõtvalt tabelis 3.18:

Tabel 3.18 Kokkuvõttev tabel

Element	Konstrukt-siooni visuaalne vaatluse hinne	Karboni-seerumis-sügavus (mm)	Betooni-kaitse-kiht (mm)	Mitte-purus-tav mee-tod	Purus-tav meetod	Armatuuri keskkond	Külma-kindlus (kg/m ²)
Alumine made	5	21	48	C45/55	C20/25	Aluseline	11,33
Ülemine made	5	49,5	73	C8/10	C8/10	Aluseline	1,21
Raudbetoon-plaat	5	42	5	C12/15	C12/15	Neutraalne	2,34
Raudbetoon-tala	5	0	19	C50/60	C25/30	Aluseline	0,23

3.5.1 Alumine trepimademe katsetulemuste järelused

Alumise mademe visuaalne vaatluse tulemus oli hea, kuid esines üks horisontaalne pragu avatäite juures, mis ei mõjutanud konstruktsiooni terviklikult. Betooni kaitsekiht oli keskmisel 48 millimeetrit. Võib järelada, et betoon on hästi säilinud, kuna 53 aastaga on ainult 21 millimeetrit karboniseerunud. Karboniseerumiseks võib veel kuluda umbes sama palju aastaid, et jõuda armatuurini. Betoonis oleva armatuuri korrodeerumise hinnang oli üldiselt mitterahuldav, kuna pool konstruktsioonis asetsev teras oli passiveeriva kihi all ning ülejäänud korrosiooni tunnusmärkidega, kus roosteproduktid olid tunginud betooni. Antud elemendis ei märgatud pragunemisi ega killustatust.

Mittepurustava katsetamisel saadi katsekehade keskmise pörkearvude mediaani tulemil betooni survetugevusklassiks C45/55. Kuna antud element oli karboniseerunud 21 mm sügavuseni, mis on rohkem kui 5 mm, siis ei saa tulemusi tõlgendada mittepurustaval meetodil. Purustava katsetamise tulemusena saadi betooni survetugevusklassiks C20/25. Kõik purustatud katsekehad sisaldasid armatuuri, seega ei saa võrrelda armatuuri mõju betooni survetugevusele. Mittepurustava katse pörkearvude ja silinderkatsekehade purustava katse survetugevused võrreldi graafikul ning teostati regressioonitabel. Antud tabelis selgub, et olulise tõenäosus on lubatust suurem, kuna katsekehade valim oli väike.

Külmakindluse katses kasutati külmutusainena NaCl soolalahust. Külmakindluse massikadu oli keskmiselt 11,33 kg/m² kohta, mis on suurem kui 0,35 kg/m² kohta. Seega antud elementi ei saa kasutada välitingimustes, kus kasutatakse lumesulatamis soolasid. Katsete tulemusel oli märgata kohest suurt massikadu katsekehadel.

3.5.2 Ülemise trepimademe katsetulemuste järelendus

Ülemise mademe visuaalse vaatluse tulemus oli rahuldav, oli märgata tugevaid pinna kahjustusi ning külgedelt oli maha pudenenud kattev kiht. Ülemise mademe betooni kaitsekiht oli 73 millimeetrit. Betooni karboniseerumissügavus oli 49,5 millimeetrit, seega võib järeldada, et karboniseerumine toimus pea 1 millimeeter aastas antud elemendis. Betoonis oleva armatuuri korrosiooniuuringul kasutati ainult ühte katsekeha ning antud katsekeha tulemus oli rahuldav, kuna armatuuri painutatud osa sisemises raadiuses esines korrosiooni, mis on vähendanud terase mahtu (vt joonis 3.6).

Mittepurustava katse tulemusel saadi betooni survetugevusklassiks C8/10. Antud tulemust ei saa arvestada, kuna betoon oli karboniseerunud pea 50 millimeetri sügavuseni ning katsetatav pind oli rahuldav (kahjustunud), kuid survetugevuskatsete tulemusel saadi sama betooni survetugevusklass C8/10. Arvesse läinud katsekehade neljast üks sisaldas armatuuri, kuid armatuuri olemasolu katsekehas ei mõjutanud katsetulemusi. Mittepurustava katse põrkearvude ja silinderkatsekehade purustava katse survetugevused võrreldi graafikul ning teostati regressioonitabel. Antud tabelis selgub, et olulise tõenäosus on lubatust suurem, kuna katsekehade valim oli väike.

Külmakindluse katses kasutati külmutusainena NaCl soolalahust. Külmakindluse massikadu oli keskmiselt 1,21 kg/m² kohta, mis on suurem kui 0,35 kg/m², seega antud element ei pea vastu külmumis-sulamis katsetele kui kasutatakse lumesulatamis soolasid. Katsekehade murenemine toimus täitematerjalist, kui betoonist endast.

3.5.3 Raudbetoonplaadi katsetulemuste järelendus

Raudbetoonplaadi visuaalse vaatluse tulemus oli väga hea, kuna antud konstruktsioon püsis kuivas ning oli kaetud SBS kihiga. Antud konstruktsioonis ilmnes asjaolu, et armatuur, mille kaitsekiht oli minimaalselt 5 millimeetrit, oli täielikult karboniseerunud alas. Karboniseerumissügavus elemendis oli 42 millimeetrit. Kõik terassarrused, mis asusid elemendis paiknesid neutraalses keskkonnas. Korrosiooniuuringul esines elemendis silearmatuuri ja A-II klassi armatuuri. A-II armatuur oli enamasti passiveeriva kihi all, kuid esines üksikuid korrosiooniprodukte. Katsekehad, mis sisaldasid silearmatuuri, olid enamasti korrodeerunud ning andnud korrosiooniprodukte betooni, kuid ei esinenud pragunemist ega killustumist antud katsekehadel.

Mittepurustava katsetuste tulemuseks saadi betooni survetugevusklassiks C12/15. Antud konstruktsioonis oli karboniseerumissügavus 42 millimeetrit, seega ei saa tõlgendada antud katsetulemusi tõeseks, kuna karboniseerumissügavus oli suurem kui

5 millimeetrit. Purustava katsete tulemusel saadi sama betooni survetugevusklass, mis mittepurustaval katsetamisel. Kaheksa katsekeha kaheteistkümnest sisaldasid armatuuri survetugevusekatses. Armatuuri sisaldus katsetatavates katsekehades ei mõjutanud survetugevuse tulemusi. Mittepurustava katse pörkearvude ja silinderkatsekehade purustava katse survetugevused võrreldi graafikul ning teostati regressioonitabel. Antud tabelis selgub, et olulise tõenäosus on lubatud piirides, seega antud graafikul saab kasutada lineaarset seost tulemuste tõlgendamisel. Antud tarindielementi saab kasutada mittepurustavatel katsetel lineaarfunktsiooni ($y = 0,9403x - 11,794$) survetugevuste arvutamiseks.

Külmakindluse katses kasutati külmutusaineks destilleeritud vett. Külmakindluse katse massikadu oli keskmiselt $2,34 \text{ kg/m}^2$, mis on suurem kui $0,50 \text{ kg/m}^2$, seega antud element ei sobi avatud konstruktsioonidesse.

3.5.4 Raudbetoontala katsetulemuste järelalus

Raudbetoontala visuaalse vaatluse tulemus oli hea. Elemendi pealmine, horisontaalne pind, mis oli avatud välismõjudele, oli kohati kahjustunud. Kahjustus võib olla tingitud lumesulamisest ning lumesulavee külmumisest. Antud elemendis ei esinenud karboniseerumist ning kõige minimaalsem betoonkaitsekiht oli 19 millimeetrit. Raudbetoonis asetses 14 millimeetrisest ja 6 millimeetrisest silearmatuuri. Kuue millimeetrisel armatuuril esines minimaalselt korrosiooni tunnuseid. Neljateistkümne millimeetrisel silearmatuuril oli märgata nii passiveerivat kihti kui roostet, mille roosteproduktid olid ka tunginud betooni, kuid ei esinenud pragunemisi ega killustatust.

Mittepurustaval katsete tulemusel saadi betooni survetugevusklassiks C50/60. Antud elemendil puudus karboniseerumine, seega võib järeldada, et mittepurustava katse tulemus on tõeväärne võrreldes teiste elementidega, mis olid mõõdetud karboniseerunud osadest. Purustava katse tulemusena saadi betooni survetugevusklassiks C25/30, mis on poole võrra väiksem kui mittepurustava katse tulemus. Ühe katsekeha tulemus oli $51,3 \text{ MPa}$ seega kui võtta ainult üks katsetulemus arvesse, saaksime betooni survetugevusklassiks C40/50. Mittepurustava katse pörkearvude ja silinderkatsekehade purustava katse survetugevused võrreldi graafikul ning teostati regressioonitabel. Antud tabelis selgub, et olulise tõenäosus on lubatud piirides, seega antud graafikul saab kasutada lineaarset seost tulemuste tõlgendamisel. Antud tarindil saab kasutada mittepurustavatel katsetel lineaarfunktsiooni ($y = 4,1664x - 198,18$) survetugevuste arvutamiseks.

Antud elemendiga katsetati nelja kuubikkatsekeha mõõtmatega 100 x 100 x 100 mm, kus võeti arvesse kolm katsekeha, kuna ühe katsekeha purustamisel jäi armatuur pikisuunas, mis mõjutas betooni survetugevuse tulemusi pea 6 MPa võrra. Arvesse võetud kolmest katsekehast üks ei sisaldanud armatuuri. Katsekehad, mis sisaldasid armatuuri, saadi katsetulemusteks 58,8 MPa ja 54,0 MPa ning katsekeha, mis ei sisaldanud armatuuri, saadi 34,2 MPa. Antud katsekehade valim oli väike ning tõeseid järeldusi ei saa teha, kuid on märgata pea 20 MPa survetugevuse vahet, kui võtta arvesse kuubikkatsekeha ilma armatuurita, saaksime betooni survetugevusklassiks C25/30, kuid kui võtta arvesse kaks armatuurisisaldusega kuubikkatsekeha, saaksime tulemuseks C45/55, mis samuti ei vasta mittepurustavate katsekehade tulemusega.

Külmakindluse katses kasutati külmutusainena destilleeritud vett. Külmakindluseks kasutati silinder- ($\varnothing 73 \times 50$ mm) ja ristkülikkatsekehasid ($150 \times 150 \times 50$ mm). Külmakindluse massikadu silinderkatsekehadel oli $0,23 \text{ kg/m}^2$ ja ristkülikkatsekehadel $0,05 \text{ kg/m}^2$, kuna silinderkatsekehadel on mass üle $0,20 \text{ kg/m}^2$ kohta, siis on tema külmakindluse klass KK1-50 ning ristkülikkatsekehade külmakindluseklass KK1-100. Antud element on olnud avatud väliskeskkonnamõjudele pea 53 aastat ning katsetulemused on märgatavalt head. Võrreldes ristkülikkatsekehi silinderkatsekehadega on märgata pea nelja kordset mahumuutust.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti lammutusele kuuluva koolihoone betooni survetugevust mittepurustaval ja purustaval meetodil ning betooni külmakindlust. Lammutusele kuuluva hoone esmane kasutuselevõtt oli 1967. aastal. Objektil valiti välja katsetatavad elemendid: ülemine made, alumine made, raudbetoontala ja raudbetoonplaat.

Antud elementidele teostati kohapeal elementide visuaalne hindamine, Schmidti pörkevasara katsed, katsekehade väljapuurimine läbimõõduga Ø73 millimeetrit ning karboniseerumissügavuse mõõtmine osaliselt kohapeal. Laboris teostati edasised tegevused. Laboris mõõdeti kõik katsekehad, kus mõõdeti väljapuuritud kärnide kõrgused, karboniseerumissügavus, betoonikaitsekiht ning terrassarruse sisaldus. Seejärel lõigati väljapuuritud kärnid 1:1 mõõtu (diameeter=kõrgusega) survetugevuskatseteks ning külmakindluse katseks (kõrgusega 50mm). Laborisse toimetati objektilt raudbetoonalaelemendi üks osa, millest lõigati välja neli survetugevuskatseks 100 x 100 x 100 mm kuubikkatsekeha ning külmakindlusekatseks kuus mõõtmega 150 x 150 x 50 mm riskülikkatsekehad. Kõikides katsetes jälgiti EVS-EN standardite põhimõtteid.

Karboniseerumissügavuse mõõtmisel esines raudbetoonplaadi armatuur karboniseerunud osas. Korrosiooniuuringutel vaadeldi peale purustavat katset armatuuri korrodeerumist. Raudbetoonplaadis asetsev A-II armatuuril esines väga väheses mahu korrosioonimärke ning oli veel passiveeriva kihi all, kuid silearmatuur oli pooleldi täielikult korrodeerunud, kus roosteproduktid olid tunginud betooni. Antud tulemused esinesid ka teistes tarindielementide katsekehades, kus karboniseerimata osas esines korrosiooni ning korrosiooniproduktid olid tunginud betooni. Ühelgi katsekehal ei märgatud terrassarruse korrosiooniproduktide kasvust pragunemist ega killustatust. Võib väita, et antud korrosioon on tingitud vähesest terrassarruse puhastamisest enne valamist.

Mittepurustava katse tulemuste põhjal järeldatud standardi EVS-EN 13791:2020 Lisa B tabel B.1 [50] järgi ei saa hinnata pörkearvudega betooni survetugevusklassi olemasolevatel konstruktsioonidel. Purustaval meetodil saadud betooni survetugevusklassid võrreldi standardi järgse betooni survetugevusklassidega, kus võib järeldada seda, et mida väiksem on konstruktsiooni survetugevus, seda täpsem on, kuid mida suuremaks läheb katsetulemuste survetugevused, seda suuremaks hindab Schmidti pörkevasar betooni survetugevusklassi kõrgemaks, kus katsetulemustes esines raudbetoontalal pea kahekordne vahe.

Mittepurustava katse põrkearvude tulemused pandi võrduma graafikus purustava katse tulemustega ning teostati regressioonitabel. Arvesse võeti ainult raudbetoonplaat ja raudbetootala, kuna ülejäänud elementide katsekehade arv oli valimis väike. Arvesse võetud seosetega saab hinnata Schmidti vasaraga antud konstruktsiooni tulemusi ning määrata reaalne survetugevus konstruktsioonis. Raudbetootala hajuvus oli märgatavalt suur, kus katsekehade tulemused paiknesid kaks üleval ja kaks allpool lineaarset joont.

Igal elemendil määrati betooni külmakindlus 28 tsükli järel. Külmakindluskatses kasutati külmutusaineks soolalahuseid trepimademe osadel ning destilleeritud vett raudbetootala ja -plaadil. Katsetulemustest on näha, et mademe osad ja raudbetoonplaat ei pea vastu külmumis-sulamis katsetele. Raudbetootalal kasutati külmumis-sulamis katsel ristkülikkatsekehi ja silinderkatsekehi, kus ristkülikkatsekehade massikadu oli neli korda väiksem kui silinderkatsekehadel. Selle tulemusena saadi silinderkatsekehadel kasutuseaks 50 aastat ning ristkülikkatsekehadel 100 aastat, seega võib järeldada, et mida suurem on katsetatav pind, seda väiksem on massikadu.

SUMMARY

The present master's thesis investigated the compressive strength of concrete in a school building to be demolished by a non-destructive and destructive method and the frost resistance of concrete. The first commissioning of the building to be demolished was in 1967. The elements to be tested were selected on the site: upper stair slab, lower stair slab, reinforced concrete beam and reinforced concrete slab.

For these elements, visual inspection of the elements, Schmidt hammer tests, drilling of test specimens with a diameter of Ø73 mm and partial carbonation depth measurements were performed on site. Further activities were performed in the laboratory. All test specimens were measured in the laboratory, where the heights of drilled cores, the depth of carbonation, the concrete protective layer and the content of steel reinforcement were measured. In it, drilled cores were cut to size 1:1 (diameter = height) for compressive strength tests and frost resistance tests (height 50 mm). A part of the reinforced concrete beam element was delivered to the laboratory from the site, from which four 100 x 100 x 100 mm cube test specimens were cut out for the compressive strength test and six 150 x 150 x 50 mm rectangular bodies for the frost resistance test. In all tests, the operations of EVS-EN standards were followed.

When measuring the carbonation depth, the reinforced concrete slab reinforcement was present in the carbonized part. Corrosion studies looked at the corrosion of the reinforcement after a destructive test. The reinforcement A-II in the reinforced concrete slab showed very little signs of corrosion and was still passive under the layer, but the smooth reinforcement was constantly corroded, where rust products had penetrated the concrete. These results were also found in other test specimens of structural elements, where non-carbonated part was corroded, and corrosion products had penetrated the concrete. No cracking or fragmentation was observed in the growth of the steel reinforcement corrosion products on any of the test pieces. It can be declared that this corrosion is due to so little cleaning of the steel reinforcement before casting.

The existing structure of the compressive strength class of impact concrete cannot be assessed according to Table B.1 of Annex B to the standard EVS-EN 13791:2020 [50], which is inferred from the results of the non-destructive test. The compressive strength classes of the concrete obtained by the crushing method were compared with the concrete compressive strength classes following the standard, where it can be concluded that the lower the compressive strength in the structure, the Schmidt hammer rebound number is the same, but the higher the compressive strengths of the test results, the higher the Schmidt hammer rebound number is.

A comparison of the results of the non-destructive test impact numbers was plotted equal in a graphical regression table of the crushing test results and performance. Only reinforced concrete slabs and reinforced concrete beams were considered, as the number of test pieces for other elements was small in the sample. The results can be evaluated with Schmidt's hammer rebound number and the real compressive strength in the structure can be determined with the connections considered. The scatter of the reinforced concrete beam was remarkably high, with the test specimens being located two above and two below the linear line.

The frost resistance of the concrete was determined for each element after 28 cycles. In the frost resistance test, saline solutions on parts of the stairwell and distilled water on a reinforced concrete beam and slab were used as a refrigerant. The test results show that the parts of the mat and the reinforced concrete slab do not withstand the freeze-thaw tests. Freeze-melt viewing of rectangular specimens and cylindrical specimens was used on the reinforced concrete beam, where the weight loss of the rectangular specimens was four times smaller than that of the cylindrical specimens. It gave a lifespan of 50 years for cylindrical test specimens and 100 years for rectangular test specimens, so it can be concluded that the larger the test surface, the lower the weight loss.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] 2018/844/EL, "EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV (EL) 2018/844, millega muudetakse direktiivi 2010/31/EL hoonete energiatõhususe kohta ja direktiivi 2012/27/EL energiatõhususe kohta," *Euroopa Liidu Teat.*, 2018, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>.
- [2] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, "Aastaks 2050 tuleb renoveerida suur osa hoonefondist," 2020. <https://www.mkm.ee/et/uudised/aastaks-2050-tuleb-renoveerida-suur-osa-hoonefondist>.
- [3] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium. and Taltech Ehituse ja arhitektuuri instituut, "Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia," Tallinn, 2020.
- [4] G. Chen, Y. Lv, Y. Zhang, and M. Yang, "Carbonation depth predictions in concrete structures under changing climate condition in China," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 119, no. October 2020, p. 104990, 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104990.
- [5] P. Benítez, F. Rodrigues, S. Talukdar, S. Gavilán, H. Varum, and E. Spacone, "Analysis of correlation between real degradation data and a carbonation model for concrete structures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 95, pp. 247–259, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.09.019.
- [6] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, 2nd Edition*. Wiley-VCH, 2013.
- [7] W. Feng, A. Tarakbay, S. Ali Memon, W. Tang, and H. Cui, "Methods of accelerating chloride-induced corrosion in steel-reinforced concrete: A comparative review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 289, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123165.
- [8] R. W. Revie and H. H. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2008.
- [9] J. P. Broomfield, *Corrosion Of Steel In Concrete- 2nd Edition*. Taylor & Francis, 2007.
- [10] L.-M. Raado, *Ehitusmaterjalid*. Tallinn: Printon, 2018.
- [11] T. Kalamees et al., *Eesti eluasemefondi suurpaneel-korterelamute*

ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga. Tallinn, 2009.

- [12] C. . Hansson, A. Poursaei, and S. J. Jaffer, "Corrosion of Reinforcing Steel Bars in Concrete," *The Masterbuilder*, 2012, doi: 10.3323/jcorr1954.18.3_110.
- [13] K. Õiger, *Ehitiste Renoveerimine. Kolmas, parandatud trükk*. TTÜ Kirjastus, 2015.
- [14] C. F. Chang and J.-W. Chen, "The experimental investigation of concrete carbonation depth," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 9, pp. 1760–1767, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.025.
- [15] J. Hinks and G. Cook, *The Technology of Building Defects*. Taylor & Francis, 2003.
- [16] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, and W. C. Panarese, *Design and Control of Concrete Mixtures: 14th edition*. Portland Cement Association, 2008.
- [17] ACI Committee 201, *Guide to Durable Concrete ACI 201.2R-08*. American Concrete Institute, 2008.
- [18] EVS 814:2020, "Normaalbetooni külmakindlus. Määratlused, spetsifikatsioonid ja katsemeetodid," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [19] H. Zhang, *Building Materials in Civil Engineering*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2011.
- [20] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete*. 2004.
- [21] J. Saarepuu, "RAUDBETOONIST VAHELAE RENOVEERIMINE," Eesti Maaülikool, Tartu, 2019.
- [22] M. A. Saleem, S. Abbas, and M. L. Nehdi, "Assessment of reinforced concrete slabs using in-situ load testing: A case study," *J. Build. Eng.*, vol. 25, 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.100844.
- [23] M. Kiviste, "Armatuurterase korrosioon ja selle mõju ribipaneelide kandevõimele," Eesti Põllumajandusülikool, Tartu, 2004.
- [24] M. Kiviste, "Olemasolevate raudbetootarindite seisund ja jääkkandevõime," Eesti Maaülikool, Tartu, 2011.
- [25] G. Ramesh, D. Srinath, D. Ramya, and B. Vamshi Krishna, "Repair, rehabilitation and retrofitting of reinforced concrete structures by using non-

- destructive testing methods," *Mater. Today Proc.*, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.778.
- [26] A. H. H. Kwan and P. L. Ng, "Building diagnostic techniques and building diagnosis: The way forward," *Lect. Notes Mech. Eng.*, vol. 19, no. November, pp. 849–862, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-09507-3_74.
- [27] G. Concu, B. de Nicolo, and L. Pani, "Non-destructive testing as a tool in reinforced concrete buildings refurbishments," *Struct. Surv.*, vol. 29, no. 2, pp. 147–161, 2011, doi: 10.1108/02630801111132821.
- [28] F. Faqih and T. Zayed, "Defect-based building condition assessment," *Build. Environ.*, vol. 191, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107575.
- [29] J. H. Bungey, S. G. Millard, and M. G. Grantham, *Testing of Concrete in Structures, 4th Edition*, 4th ed. Taylor & Francis, 2006.
- [30] C. Urbanowicz, "Effective diagnosis of material problems and defects in building and construction," *Struct. Surv.*, vol. 4, no. 1, pp. 42–46, 1986, doi: <https://doi.org/10.1108/eb006227>.
- [31] K. Ali-Benyahia, Z. M. Sbartai, D. Breysse, M. Ghrici, and S. Kenai, "Improvement of nondestructive assessment of on-site concrete strength: Influence of the selection process of cores location on the assessment quality for single and combined NDT techniques," *Constr. Build. Mater.*, vol. 195, pp. 613–622, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.032.
- [32] International Atomic Energy Agency, *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Vienna: IAEA, 2002.
- [33] EVS-EN 12504-2:2012, "Konstruktsiooni betooni katsetamine. Osa 2: Mittepurustav katsetamine. Põrkearvu määramine," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [34] EVS-EN 12504-4:2004, "Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [35] EVS-EN 12504-3:2005, "Testing concrete in structures - Part 3: Determination of pull-out force," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [36] EVS-EN 12504-1:2019, "Konstruktsiooni betooni katsetamine. Osa 1: Puursüdamikud. Võtmine, ülevaatus ja survekatse," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.

- [37] EVS-EN 12390-3:2019, "Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [38] EVS-EN 12390-4:2019, "Kivistunud betooni katsetamine. Osa 4: Survetugevus. Katsemasinatele esitatavad nõuded," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [39] H. R. Kumavat, N. R. Chandak, and I. T. Patil, "Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00491.
- [40] R. SADZEVICIUS, T. SANKAUSKIENE, and P. MILIUS, "Comparison of Concrete Compressive Strength Values Obtained Using Rebound Hammer and Drilled Core Specimens," 2015, doi: 10.15544/rd.2015.011.
- [41] M. Kiviste and J. Miljan, "Structural Concrete Compressive Strength Determination with Rebound Hammer," *Mech. Eng.*, vol. 74, no. 27, pp. 1–7, 2007.
- [42] K. Amini, M. Jalalpour, and N. Delatte, "Advancing concrete strength prediction using non-destructive testing: Development and verification of a generalizable model," *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 762–768, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.131.
- [43] M. Alwash, D. Breyse, and Z. M. Sbartai, "Non-destructive strength evaluation of concrete: Analysis of some key factors using synthetic simulations," *Constr. Build. Mater.*, vol. 99, pp. 235–245, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.023.
- [44] D. Breyse, "Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 33, pp. 139–163, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103.
- [45] V. M. Malhotra and N. J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition*. CRC Press, 2004.
- [46] Proceq SA, "Concrete Test Hammer, DIGI-SCHMIDT 2000 Modell ND/LD," 2017. https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/DigiSchmidt_Operating_Instructions_Multilingual_high.pdf.
- [47] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, "Ehitisregister." www.ehr.ee.

- [48] Valga Vallavalitsus, "Valga Priimetsa Kooli renoveerimine nüüdisaegse õpikeskkonnaga kooliks." <https://www.valga.ee/valga-priimetsa-kooli-renoveerimine>.
- [49] J. Miljan, "Põllumajanduslike tootmishoonete seisukorra hindamise meetoodika," Tartu, 1975, p. 28.
- [50] EVS-EN 13791:2020, "Betooni survetugevuse hindamine konstruktsioonides ja valmistoodetes," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [51] EVS-EN 12390-7:2019/AC:2020, "Kivistunud betooni katsetamine. Osa 7: Kivistunud betooni tihedus," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [52] EVS-EN 206:2014+A2:2021, "Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [53] EVS-EN 1992-1-1:2005+A1:2015+NA:2015, "Eurokoodeks 2: Betoonkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonetele," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [54] EVS-EN 1990:2002+NA:2002, "Eurokoodeks. Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused," Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ.
- [55] J. Valgur, "Raudbetoonkonstruktsioonid I: Sissejuhatus I. Materjalid," in *TTÜ Loengukonspekt*, 2014.
- [56] L. Oit and E. Ojamaa, "Kas betoon alati kaitseb terast roostetamise eest?," in *Tehnika ja Tootmine. Nr 7.*, 1974, pp. 358–360.
- [57] ГОСТ 12730.3-78, "БЕТОНЫ, Метод определения водопоглощения," Кодекс.

LISAD

Lisa 1 Survekatsed

Tabel L1.1 Survekatsetulemused

Element	Katsekeha	h (mm)	d (mm)	m (g)	A (mm ²)	D (kg/m ³)	F (kN)	F (N)	MPa (N/mm ²)	Armatuuri esinemine kaugus	Armatuuri paksus	Armatuuri esinemine kaugus	Armatuuri paksus	Purunemispilt
Alumine made	1A	74	73	716,6	4185	2282	116	116000	27,7	24	6	-	-	MR
	2A	72	73	689,2	4185	2319	106,6	106600	25,5	30	6	22	6	MR
	7A	73	73	701,6	4185	2296	55,7	55700	13,3	30	6	-	-	MR
	8A	74	73	714,8	4185	2277	106,7	106700	25,5	17	6	-	-	R
Ülemine made	1Ü	73	73	604,5	4185	1979	38,6	38600	9,2	-	-	-	-	MR
	2Ü	73	73	600,1	4185	1964	47,8	47800	11,4	-	-	-	-	MR
	3Ü	74	73	614,9	4185	1959	70	70000	16,7	-	-	-	-	MR
	5Ü	74	73	629,4	4185	2005	67,5	67500	16,1	8	6	-	-	MR
	8Ü	75	73	626,7	4185	1943	49	49000	11,7	-	-	-	-	MR
Raudbetootala	11A	75	73	816,9	4185	2533	140,8	140800	33,6	22	14	-	-	R
	11Ü	75	73	818,9	4185	2539	75,5	75500	18,0	3	14	25	6	MR
	12A	73	73	744,5	4185	2437	129,2	129200	30,9	-	-	-	-	MR
	12Ü	73	73	729,3	4185	2387	139,2	139200	33,3	-	-	-	-	MR
	14A	74	73	753,3	4185	2399	63,9	63900	15,3	26	6	-	-	MR
	15A	73	73	747,3	4185	2446	91,1	91100	21,8	26	6	-	-	R
	15Ü	73	73	726,5	4185	2378	67,4	67400	16,1	-	-	-	-	MR
	16A	74	73	752,6	4185	2397	105,4	105400	25,2	27	6	-	-	MR
	16Ü	74	73	749,4	4185	2387	103,3	103300	24,7	-	-	-	-	MR
	17A	74	73	744,7	4185	2372	116,9	116900	27,9	-	-	-	-	MR
	17Ü	72	73	705,0	4185	2372	108,7	108700	26,0	-	-	-	-	MR
	19A	75	73	793,6	4185	2461	115,8	115800	27,7	20	14	-	-	MR
	19Ü	75	73	813,2	4185	2522	214,8	214800	51,3	14	14	-	-	MR
	20A	73	73	755,0	4185	2471	201,8	201800	48,2	30	6	-	-	MR
	20Ü	70	73	704,4	4185	2507	160,1	160100	38,3	-	-	-	-	MR

Tabel L1.2 Survekatsetulemused

Element	Katsekeha	h (mm)	d (mm)	m (g)	A (mm ²)	D (kg/m ³)	F (kN)	F (N)	MPa (N/mm ²)	Armatuuri esinemine kaugus	Armatuuri paksus	Armatuuri esinemine kaugus	Armatuuri paksus	Purunemispilt
Raudbetoonplaat	25	74	73	732,6	4185	2333	58,4	58400	14,0	9	6	12	10	MR
	26	75	73	747,7	4185	2318	53,1	53100	12,7	2	10	-	-	MR
	27	74	73	752,0	4185	2395	69,3	69300	16,6	4	10	-	-	MR
	28	75	73	749,3	4185	2323	78,2	78200	18,7	12	10	-	-	MR
	29	73	73	742,4	4185	2430	108,7	108700	26,0	6	6	10	10	MR
	30	73	73	716,7	4185	2346	89,6	89600	21,4	-	-	-	-	R
	32	75	73	760,2	4185	2357	62	62000	14,8	4	10	-	-	MR
	36	75	73	746,7	4185	2315	48,1	48100	11,5	-	-	-	-	MR
	37	75	73	742,3	4185	2302	34,5	34500	8,2	8	10	-	-	MR
	39	76	73	751,0	4185	2268	58,2	58200	13,9	3	10	-	-	R
	40	76	73	767,3	4185	2317	68,2	68200	16,3	1	6	7	10	R
	42	75	73	720,0	4185	2233	74,8	74800	17,9	-	-	-	-	R
	43	74	73	714,8	4185	2277	81,4	81400	19,4	-	-	-	-	R

Tabel L1.3 Survekatsetulemused

Element	Katsekeha	a (mm)	b (mm)	c (mm)	Mass(g)	D (kg/m ³)	A	F (kN)	F (N)	MPa (N/mm ²)	Armatuuri esinemine kaugus	Armatuuri paksus	Armatuuri esinemine kaugus	Armatuuri paksus	Purunemispilt
RB Tala	K1	101	103	106	2720,3	2467	10403	611,6	611600	58,8	15	14	-	-	R
	K2	99	104	104	2597,2	2426	10296	666	666000	64,7	48	6	-	-	MR
	K3	104	105	106	2633,5	2275	10920	373,9	373900	34,2	-	-	-	-	MR
	K4	105	104	98	2618,7	2447	10920	589,7	589700	54,0	48	6	-	-	R

Lisa 2 Karboniseerumissügavuse mõõtmine

Tabel L2.1 Karboniseerumissügavuse ja betoonkaitsekihi mõõtmine

	Katsekeha	Kärni kõrgus	Karb. Sügavus	Kaitsekiht 1 (mm)	Kaitsekiht 2	Kaitsekiht 3
Alumine made	1A	82	21	49	-	-
	2A	82	21	51	-	-
	3A	86	25	-	-	-
	4A	87	23	-	-	-
	5A	85	19	-	-	-
	6A	82	20	-	-	-
	7A	84	21	39	-	-
	8A	86	19	52	-	-
Ülemine made	1Ü	97	45	-	-	-
	2Ü	96	45	-	-	-
	3Ü	99	56	83	-	-
	4Ü	99	61	-	-	-
	5Ü	97	47	63	-	-
	6Ü	98	51	-	-	-
	7Ü	101	49	-	-	-
	8Ü	97	50	-	-	-
	10Ü	94	42	-	-	-
Raudbetoonkala	11T	164	-	44	61	48
	12T	167	-	-	-	-
	13K	102	-	40	64	-
	14K	165	-	36	-	-
	15s	162	-	39	-	-
	16s	162	-	36	-	-
	17K	166	-	-	-	-
	18s	81	-	25	-	-
	19s	161	-	16	44	-
	20T	167	-	35	-	-

Tabel L2.1 Karboniseerumissügavuse ja betoonkaitsekihi mõõtmine

	Katsekeha	Kärni kõrgus	Karb. Sügavus	Kaitsekiht 1 (mm)	Kaitsekiht 2	Kaitsekiht 3
Raudbetoonplaat	25	84	36	12	10	-
	26	85	43	11	-	-
	27	84	30	10	-	-
	28	84	32	9	-	-
	29	82	39	10	6	-
	30	83	39	10	-	-
	31	84	46	10	-	-
	32	83	42	10	-	-
	33	82	48	10	-	-
	34	84	42	10	-	-
	36	95	50	19	-	-
	37	97	47	14	-	-
	38	96	48	5	-	-
	39	96	45	8	-	-
	40	101	45	5	10	-
	41	98	45	10	-	-
	42	96	40	-	-	-
	43	95	41	-	-	-

Lisa 3 Lammutatud hooneosa



Joonis L3.1 Lammutatud hooneosad



Joonis L3.2 Lammutatud hooneosad



Joonis L3.3 Lammutatud hooneosad

Lisa 4 Betoonkamaka lõikamine



Joonis L4.1 Autor lõikamas



Joonis L4.2 Külmakindluse katsekehade lõikusel lõigati armatuuriga pikisuunas



Joonis L4.3 Raudbetoontala lõikamisjoone märkimine, kus on märgata lõikejoone kõrval asetsevat teemantpuurimisseadme stativi ankrut

Lisa 5 Külmakindluse katsed



Joonis L5.1 Alumise mademe katsekehade külmakindluse katse massikaod anumad peale 21. tsükli



Joonis L5.2 Ülemise mademe katsekehade külmakindluse katse massikaod anumad peale 21. tsükli



Joonis L5.3 Raudbetoontala katsekehade külmakindluse katse massikaod anumus peale 21. tsükli



Joonis L5.4 Raudbetoonplaadi katsekehade külmakindluse katse massikaod anumus peale 21. tsükli

Lisa 6 Korrosiooni uurimine



Joonis L6.1 Armatuurterase läbimõõdu mõõtmine nihikuga