



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOI
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

BETOONI KÜLMAKINDLUSE ALTERNATIIVSE KATSEMETOODIKA UURIMINE

STUDY OF AN ALTERNATIVE TEST METHODOLOGY FOR THE FROST RESISTANCE OF CONCRETE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jane-Ly Tammekivi

Üliõpilaskood 192665EATI

Juhendaja: Olari Valter, külalisõppejõud

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.

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

Autor: Jane-Ly Tammekivi

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: Olari Valter

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Jane-Ly Tammekivi (*autori nimi*)

1. annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Betooni külmakindluse alternatiivse katsemetoodika uurimine",

mille juhendaja on Olari Valter,

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)

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

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Jane-Ly Tammekivi, 192665 (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: EATI02/17 - Teedehituse ja geodeesia (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): külalisõppejõud Olari Valter (amet, nimi, telefon)
Konsultant: Tanel Tuisk, lektor - Ehitusprotsessi uurimisrühm: Ehituse ja arhitektuuri instituut

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Betooni külmakindluse alternatiivse katsemetoodika uurimine*
(inglise keeles) *Study of an alternative test methodology for the frost resistance of concrete*

Lõputöö põhieesmärgid:

- AVA meetodika efektiivsuse hindamine betooni külmakindluse mõõtmisel alternatiivse meetodina.
- Uurida, kas betooni koostisele esitatavate nõuete kohaselt suurem õhu eripind kompenseerib suuremat v/ts suhet või väiksemat tsemendi kogust ning vastupidi.
- Uurida, kas AVA meetodikal mõõdetud õhumullide eripind vähemalt 25 mm⁻¹ tagab alati betooni külmakindluse.
- Edasiste soovitude andmine betooni külmakindluse hindamise parandamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö teema ja meetodika valik	12.10.2023
2.	Katsete teostamine ja teooria kirjutamine	05.03.2024
3.	Katsete analüüs	31.03.2024
4.	Lõputöö vormistamine	26.04.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20.05.2024 a

Üliõpilane: Jane-Ly Tammekivi ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Olari Valter ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: Tanel Tuisk ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: Mihkel Kask ".....".....20.....a
/allkir/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	9
1 TEOREETILINE OSA	11
1.1 Betooni kestvus ja mõjurid	11
1.1.1 Keskkonnaklassid	12
1.1.2 Kliima mõju betoonile	13
1.2 Betooni külmakindlus	14
1.2.1 Külmakindluse tähtsus betoonis	16
1.2.2 Külmakindla betooni vajalikkus	16
1.2.3 Külmakahjustused	17
1.2.4 Betooni külmakindluse mõjurid	19
1.3 Betooni koostisosade mõju külmakindlusele	19
1.3.1 Täitematerjalide mõju betooni külmakindlusele	20
1.3.2 Peentäitematerjalide mõju betooni külmakindlusele	22
1.3.3 Tsemendi mõju betooni külmakindlusele	23
1.3.4 Lisandite mõju betooni külmakindlusele	25
1.3.5 Seguvee mõju betooni külmakindlusele	27
1.3.6 Õhu mõju betooni külmakindlusele	27
1.3.7 V/ts suhte mõju betooni külmakindlusele	29
1.4 Betooni valmistamise ning järelhoolduse mõju külmakindlusele	30
1.4.1 Külmakindel betoon infrastruktuuri rajatistel	31
1.4.2 Sildade hooldus ja selle mõju külmakindlusele	33
1.4.3 Betooni kaitsmine väliselt	35
1.5 Külmakindluse katsetamise meetodid	37
1.5.1 Traditsioonilised meetodid	38
1.5.2 Traditsiooniliste meetodite puudused ja väljakutsed	41
1.5.3 Uuenduslikud meetodid betooni struktuuri hindamiseks	42
1.5.4 ASTM C457/C457M-16 standardi meetodi selgitus	42
1.5.5 AVA meetodi selgitus	45
2 KATSELINE OSA	48
2.1 Metoodika	48
2.1.1 Katseplaan ja eesmärk	48
2.1.2 Materjalide ettevalmistamine	50
2.1.3 Materjalide valik ja nende proportsioonid	51

2.1.4	Konsistentsi määramine	52
2.1.5	Õhu sisaldus rõhumeetodil.....	52
2.1.6	Katsekehade valmistamine ja kivinemine.....	53
2.1.7	Survetugevus.....	54
2.2	Külmakindluse katsete läbiviimine	54
2.2.1	Koorunud materjali hulga katse.....	54
2.2.2	ASTM C457/C457M-16 standardi katsed	56
2.2.3	AVA meetodi katsed.....	58
2.3	Tulemused ja analüüs.....	59
2.3.1	Katsekehade analüüs	61
2.3.2	AVA tulemuste prognoos pinnakoorumisele.....	62
2.3.3	AVA võrdlus traditsioonilise meetodiga	65
2.3.4	AVA võrdlus rõhumeetodil saadud õhusisaldusega	69
2.3.5	AVA võrdlus ASTM C457/C457M-16 standardi meetodiga.....	71
2.3.6	AVA sõltuvus v/ts suhtest.....	72
2.3.7	AVA sõltuvus täitematerjalidest.....	76
2.3.8	AVA sõltuvus liiva sisaldusest.....	78
2.3.9	AVA sõltuvus õhku manustavast lisandist	80
2.3.10	AVA sõltuvus õhu sisaldusest	82
2.3.11	Survetugevuse sõltuvus AVA-st	83
2.3.12	Survetugevuse sõltuvus õhu sisaldusest	86
2.3.13	Betooni konsistendi sõltuvus AVA-st.....	87
2.4	Alternatiivsete meetodite eelised ja väljakutsed	89
2.4.1	Edasiste uuringute suunad.....	90
2.5	Järeldused	91
	KOKKUVÕTE	94
	SUMMARY.....	96
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	98
	Lisa 1 – AVA tulemuste väljavõte.....	105

EESSÕNA

Betooni külmakindluse määramise alternatiivse meetodi uurimise idee tekkis koostöös juhendaja Olari Valteriga ja peegeldab ühist huvi leida uuenduslikke lahendusi betoonkonstruktsioonide pikaealisuse tagamiseks. Erilised tänusõnad kuuluvad Remei Baltic OÜ-le, Teede Tehnokeskusele ning TalTechi ehitusmaterjalide teadus- ja katselaboratoriumile, kes aitasid katsete läbiviimisega. Lisaks aitas konsultatsioonidega autorit TalTechi lektor Tanel Tuisk.

Uurimistöö keskmes on alternatiivse meetodi analüüs betooni külmakindluse määramiseks, mis on oluline aspekt betoonkonstruktsioonide usaldusväärsuse ja kestvuse hindamisel. Uurimistöö raames tutvustatakse ja analüüsitakse *Air Void Analyzer*-i kasutamist, mis pakub uusi perspektiive betooni mikrostruktuuri mõistmiseks ja selle vastupidavuse hindamiseks külmumis-sulamistsüklikele. Töö eesmärk on edendada teadlikkust betooni külmakindluse olulisusest ja pakkuda praktilist lahendust selle paremaks määramiseks ning luua algus uue meetodi kasutusele võtuks.

Lõputöö autor soovib tänada kõiki, kes aitasid andmete kogumisel, konsultatsioonidel ja praktiliste katsetuste läbiviimisel.

Võtmesõnad: Air Void Analyser, AVA, betoon, külmakindlus, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

v/ts – vesi-tsementtegur

AVA – *Air Void Analyzer*

SISSEJUHATUS

Transpordiameti „Teedetööde tehnilises kirjelduses“ [1] on välja toodud nõue, et betoonkonstruktsioon peab vastama projekteerimisel ette nähtud tugevusele ning külmakindlusele. Betoonkonstruktsioonide kvaliteet ja vastupidavus külmas kliimas on olulised tegurid, mis mõjutavad otseselt nende pikaajalist säilivust ja ohutust. Betooni külmakindlus on üks olulisemaid aspekte, mis määrab selle vastupidavuse karmidele ilmastikutingimustele, eriti regioonides nagu Eesti, kus ööpäevased temperatuurikõikumised võivad oluliselt muutuda. Tavapärased meetodid betooni külmakindluse hindamiseks, nagu näiteks EVS 814 [2] standardi kohaselt läbiviidavad katsed, võtavad aega 28+56 päeva, mis omakorda tähendab, et tulemused saabuvad ajal, mil ehitised on valmis või peaaegu valmis. Selline olukord võib kaasa tuua mitmeid probleeme ja tagajärgi nii ehitusettevõtetele kui ka tellijatele.

Üheks probleemiks on see, et kui betooni külmakindluse katsetulemused ei vasta kehtestatud standarditele, ei ole konstruktsioon püsiv. Ehituse perioodil võib see kaasa tuua konstruktsiooni lammutamise, kuid selleni jõutakse väga harva. Kui ehitised ei vasta külmakindluse nõuetele, peab töövõtja lisaproovid võtma. Suurema tõenäosusega tuleb töövõtjal trahvi maksta ning konstruktsioon jäetakse püsti, sest külmakindluse katsete tulemuste jõudmise ajaks on konstruktsioon juba valminud. Külmakahjustusega betoon võib olla konstruktiivselt ohtlik. On oluline märkida, et betoonehitiste eeldatav eluiga on 100 aastat, mida mõjutavad betooni külmakindlus ja vastupidavus keskkonna mõjuritele.

Lisaks, kui betoonkonstruktsioon ei vasta külmakindluse nõuetele, vähendatakse ehitaja saadavat tasu vastavalt valemile, kus arvestatakse betoonpinna tegelikku pinnakoorumise massikadu, lubatud massikadu, konstruktsiooni hinda eurodes kuupmeetri kohta ja konstruktsiooni või detaili mahtu kuupmeetrites. Tasu vähendamine toimub ainult siis, kui massikadu ületab 20% lubatust, misjärel võib osutada vajalikuks konstruktsiooni või selle osa ümbertegemine. [3] Selline süsteem ei ole ennetlik rajatise kestvuse ning kvaliteetsuse osas.

Olukorra parandamiseks ja betoonkonstruktsioonide kvaliteedi tagamiseks on vajalik leida kiiremaid ja täpsemaid meetodeid betooni külmakindluse hindamiseks. Õhusisaldus, õhu eripind ja paigutustegur on olulised tegurid betooni külmakindluse hindamisel, kuna need mõjutavad betooni õhusisaldust ja selle jaotust. Õhusisaldust mõõdetakse traditsiooniliselt rõhumeetodil [4], kuid täpsemate tulemuste saamiseks

kasutatakse meetodeid mikroskoopilistel tasanditel, näiteks ASTM C457/C457M-16 standardi järgi. [5]

Alternatiivseks meetodiks on *Air Void Analyzer-i* (edaspidi AVA) kasutamine, mis võimaldab värskes betoonisegus olevate õhumullide eripinda ja vahekaugust mõõta. Selle tehnoloogiaga saab võimalikke probleeme betoonisegus varakult tuvastada ning teha vajalikke kohandusi enne betooni paigaldamist, vähendades seeläbi riski halva kvaliteediga betooni kasutamisele ja sellest tulenevatele tagajärgedele.

Töö eesmärk on uurida ja hinnata AVA meetoodika korrelatsiooni alternatiivse meetodina betooni külmakindluse hindamisel ning võrrelda seda traditsiooniliste meetoditega. Soov on teada saada, kas AVA masinaga mõõdetud õhumullide eripind vähemalt 25 mm^{-1} tagab alati betooni külmakindluse. Katsed viiakse läbi vastavalt AVA meetoodika ning standardite EVS 814 [2] ja ASTM C457/C457M-16 [5] järgi ning seejärel võrreldakse neid AVA tulemustega. Lisaks tehakse AVA katse ehitusobjektidel. AVA meetoodika katsete analüüsimise ja võrdluse jaoks teiste meetoodikatega vaadatakse katsetes, kas betooni koostisele esitatavate nõuete kohaselt suurem õhu eripind kompenseerib suuremat v/ts suhet või väiksemat tsemendi kogust ning vastupidi.

Uurimustöö käsitleb ka mitmeid betooni külmakindlusega seotud olulisi aspekte, sealhulgas betooni kestvust, keskkonnaklasse, külmakahjustusi, betooni koostisosi ja välist kaitset. Läbiviidud katsete ja tulemuste analüüsi põhjal antakse soovitusi betooni külmakindluse hindamise parandamiseks.

1 TEOREETILINE OSA

1.1 Betooni kestvus ja mõjurid

Betoon on habras materjal, kuid selle edukaks kasutamiseks tuleb luua betoonisegu, mis arvestab kasutuskoha keskkonda ning muid mõjutavaid tegureid. Betoonstruktsioonid võivad olla vastupidavad erinevates keskkonnatingimustes, sealhulgas ekstreemsetes ilmastikuoludes ning agressiivsetes keskkondades nagu mere- ja tööstuspiirkonnad. [6] Agressiivne keskkond avaldab kahjulikke keemilisi, füüsikalisi, mehaanilisi ja bioloogilisi mõjusid, mis muutuvad märgatavaks korduvate tsüklitena (vt Tabel 1.1). [7] Betoonrajatiste kestvus on kriitilise tähtsusega nende ohutuse ja terviklikkuse tagamisel. Seega tuleb ehitustööde planeerimisel ja rajatiste kavandamisel arvestada erinevate keskkonnamõjudega, mis võivad aja jooksul betooni kahjustada.

Rajatise kestvuse mõiste tähendab, et konstruktsioon peab olema toimiv, arvestades erinevaid keskkonnamõjusid ja vananemist. Oluline on teostada planeeritud hooldustöid, et tagada selle püsivus. [8] EVS-EN 1990 [9] standardi kohaselt nõutakse betoonrajatistelt 100-aastast kasutusiga, mis seab kõrged nõuded nende vastupidavusele ja kestvusele. Kestvuse tagamiseks on vaja määratleda piirväärtused betooni koostisosadele ja täitematerjalidele, mis omakorda mõjutavad betooni vastupidavust.

Tabel 1.1 Betoonstruktsiooni mõjurid [7]

Iseloomustav mõjutuse liik	Klassifikatsioon
Mehaanilised mõjutused	Gravitatsioon Koormused ja rakendatavad või esile kutsutud deformatsioonid Kineetiline energia Vibratsioon ja helid
Elektromagnetilised mõjutused	Radiatsioon (kiirgus) Elekter Magnetism
Termilised mõjutused	Temperatuuride ekstremaalsed tasemed või nende kiire vahetumine

Iseloomustav mõjutuse liik	Klassifikatsioon
Keemilised mõjutused	Vesi ja lahustid Oksideerijad Redutseerijad Happed Alused Soolad Keemiliselt neutraalsed keskkonnad
Bioloogilised mõjurid	Taimed ja mikroobid Loomsed
Füüsikalised mõjutused	Erosioon Kulutamine Paisumine-kahanemine Kristallisatsioon Mahumuutused määrgumisel

1.1.1 Keskkonnaklassid

Betooni keskkonnaklassid määratlevad selle vastupidavuse erinevates keskkondades esinevatele mõjudele. Need klassid on jagatud vastavalt keskkonnatingimustele, milles betoonkonstruktsioonid asuvad või millised tegurid neid mõjutavad.

Keskkonnaklasside valik sõltub peamiselt betooni kasutamise eesmärgist ja asukohast. [8] Keskkonnaklassi valimine võib hõlmata kombineeritud betooni kasutamistingimusi või kaitsemeetmete rakendamist (nt korrosioonikindlad metallid, kattekihid). Ühes kohas võib betooni mõjutada mitu erinevat keskkonnategurit, mille korral kasutatakse sobivate keskkonnaklasside kombinatsiooni. [10]

Betooni koostise määramisel tuleb keskenduda keskkonnatingimustele ja tsemendi omadustele. Betooni püsivust mõjutavad veel mitmed tegurid, sealhulgas tsemendikivi poorsus ja füüsikalised protsessid nagu kuivamine-niiskumine ning külmumine-sulamine. [11]

Kõige sagedamini kasutatakse Euroopa standardi EVS-EN 206:2014+A1:2021 määratletud betooni keskkonnaklasse (vt Tabel 1.2), mis hõlmavad erinevaid

keskkonnatingimusi alates kuivadest sisetingimustest kuni äärmiselt niiskete ja keemiliselt agressiivsete väliskeskkondadeni. [10]

Tabel 1.2 Keskkonnaklassid [10]

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

1.1.2 Kliima mõju betoonile

Eesti kliima avaldab olulist mõju betooni omadustele. Karmid talved, kus temperatuur võib langeda alla nulli, nõuavad betoonisegude kohandamist külmakindluse tagamiseks, kasutades spetsiaalseid lisandeid ja töötlemismeetodeid. Tugev tuul ja sademed võivad mõjutada segamist, valamist ja kivinemist. Tuuline ilm võib segamist mõjutada, põhjustades materjalide hajumist. Sademed võivad lisada niiskust segule, mõjutades selle konsistentsi ja töödeldavust ning põhjustades jääkihi tekkimist, mis mõjutab betooni tugevust ja välimust. Nii tuul kui ka sademed võivad kiirendada betooni kivinemist, mis omakorda võib põhjustada pragusid ja vähendada tugevust. Seetõttu on vajalik hoolikas ilmastikutingimuste jälgimine ehitusprotsessi ajal ning vajadusel betoonisegu kohandamine vastavalt muutuvatele tingimustele. Suured temperatuurivahed erinevatel aastaegadel nõuavad erilist tähelepanu betooni valamisel ja kõvenemisel, et vältida pragusid ja tagada homogeenne struktuur.

Eesti asub kliimas, kus temperatuurid on valdavalt külmad ning seetõttu on vahelduv külmumine ja sulamine tavapärane. Näiteks on Eesti kõrgeim mõõdetud temperatuur olnud +35,6 °C ning madalam –43,5 °C. Kui vaadata aasta keskmisi temperatuure, siis 2023. aasta keskmine temperatuur oli +7,2 °C. [12] Maapinna arvutuslik külmumissügavus Eestis on 125 cm. [13] Lisaks temperatuurile mõjutavad betooni vastupidavust erinevad sademed ning jäätõrjesoolad.

Betooni kividamisprotsess hõlmab peamiselt hüdratatsioonireaktsioone, kus tsement reageerib veega, moodustades hüdraate ja andes betoonile tugevuse. Hüdratatsiooniprotsess on temperatuuritundlik ning suured temperatuurivahed võivad mõjutada selle kiirust ja kulgu. Kõrgete temperatuuride korral võib hüdratatsioon kiirenedada, mis võib viia varajase tugevuse suurenemiseni, kuid see võib kaasa tuua temperatuuripingeid ja soovimatuid pragusid. Madalad temperatuurid võivad vastupidi hüdratatsiooni aeglustada, pikendades betooni kividamisaega. [14]

1.2 Betooni külmakindlus

Betooni iseloomustamiseks saab välja tuua mitmeid omadusi: tugevus, tihedus, deformatsioon, kulumis- ja külmakindlus. Nende omaduste olulisust määravad rajatava konstruktsiooni nõuded ja töötingimused. Näiteks on külmakindlus tähtis teedehituses olevatel rajatistel (kõnnitee äärekivid, teeplaadid, viaduktid, sillad jne). [15]

Betooni külmakindluse uurimine ja hindamine algas mitukümmend aastat tagasi, kui tekkis vajadus lahendada praktilisi probleeme, eriti piirkondades, kus külmakahjustused olid levinud. Esimesed standardid ja testimismeetodid betooni külmakindluse jaoks võeti kasutusele 20. sajandi esimesel poolel. Näiteks Ameerika Ühendriikides hakkas American Concrete Institute (ACI) välja andma soovitusi ja standardeid betooni külmakindluse kohta juba 1920. ja 1930. aastatel. Euroopas hakkas Euroopa standardimisorganisatsioon (CEN) välja töötama Euroopa standardit betooni külmakindluse hindamiseks ja testimiseks alates 1970. aastatest. Betooni külmakindluse hindamine muutus seega standardiseerituks ja laialt kasutatavaks 20. sajandi teisel poolel, arendades välja ühtsed protokollid ja normid, mis aitasid tagada konstruktsioonide vastupidavust erinevates ilmastikutingimustes. Eestis hakati betooni külmakindlust määrama ja uurima samal ajal kui ülejäänud maailmas. Betooni

külmakindluse määramise meetodid ja uuringud hakkasid levima ja standardiseeruma, et tagada ehituskonstruksioonide vastupidavus karmides ilmastikutingimustes. Tõenäoliselt võeti Eestis kasutusele rahvusvahelised standardid ja mõõtmismeetodid vastavalt ülemaailmsetele arengutele betooni tehnoloogias.

Eestis esinesid esimesed betooni külmakindlusega seotud probleemid 1904. aastal, kui valmis Kasari sild. Enne silla proovikoormust oli märgata veetilku läbi silla lae, hoolimata projekteeritud torudest vee äravooluks ja muudetud kallet. Kogemuse puudumise tõttu ei võetud betooni filtratsiooniprobleemi tõsiselt ning esialgu ei paigaldatud vettpidavat asfaldikihti, mis hiljem lisati ettevaatusabinõuna. Temperatuurimuutuste tagajärjel tekkisid sillal praod kaartes, laes ja mitmetes muudes kohtades. Külmade temperatuuride tõttu suurenesid praod, kuid sild talus uut koormustesti edukalt ning suurimate pragude kohal asuv sarrus jäi terveks. Siiski hakkasid aastatega vee filtratsiooniprobleem ja külma temperatuuri mõju betoonile purustavat mõju avaldama. 1928. aastal, kui silda remonditi, oli sarruse kaitsekiht maha varisenud ja sarrus ise oli 22% ulatuses roostetanud. [16]

Betooni kahjustumine külmumise ja sulamise tõttu on kõige tavalisem probleem betoonkonstruktsioonide halvenemisel. Betooni külmakindlus sõltub selle struktuurist, sealhulgas pooride, kapillaaride suurusest, jaotusest ja tüübist (avatud ja suletud poorid). Betoon on poorne materjal, mille kapillaarsed poorid tekivad liigse vee eemaldamisel. Need avatud poorid kahjustavad betooni külmakindlust. Õhuga lõksu jäänud suletud poorid aga parandavad seda. Betooni külmakindlus mõjutab nii avatud kui ka suletud poorsust ning seda saab mõõta külmakindluse faktoriga K_F (vt Valem 1.1). [17]

$$K_F = \frac{P_u}{0,09P_a} \quad (1.1)$$

kus

P_u on betooni suletud poorsus;

P_a on betooni avatud poorsus.

Külmumise ja sulamise tsüklid võivad betoonile kahju tekitada, kui betooni poorid vett sisaldavad. Külmates vesi paisub ning seejärel tekitab pinget betooni struktuuris. See võib põhjustada pragusid ning nõrgendada betooni struktuuri ja vastupidavust. Pidev külmumine-sulamine võib põhjustada pooride laienemist, mõjutades betooni omadusi ja kestvust ning võib lõppkokkuvõttes põhjustada pragunemist ja struktuurilisi probleeme. Betonipoorides olev vesi külmub erinevatel temperatuuridel sõltuvalt poori suurusest. Geelipoorides olev vesi tavaliselt ei külmu, kuid osades kapillaarides ja

täitematerjali poorides, eriti madalatel temperatuuridel, see külmub. Kui küllastunud pooris tekib jää, tekitab see pastas tõmbepinged, mis võivad põhjustada vee väljavoolu pooridest ja pragusid. Sobivate meetodite ja lahenduste leidmine on oluline, et survet ja pingeid vähendada ning kahjustusi vältida. [6]

1.2.1 Külmakindluse tähtsus betoonis

Betooni külmakindlus on oluline omadus, kuna betoonkonstruktsioonid puutuvad kokku mitmesuguste kliimatingimustega, sealhulgas külmade temperatuuride ja külmakahjustuste riskiga piirkondadega. [18] Külmakindel betoon on lagunemata võimeline taluma korduvaid külmumis- ja sulamistsükleid, mis võivad esineda külmas kliimas või piirkondades, kus temperatuur varieerub oluliselt või jõuab vee külmumispiirist allapoole.

Põhjused, miks betoon peab olema külmakindel:

1. Külmakahjustuste ennetamine – külmumisel paisub vesi, mis võib põhjustada betoonis pragusid ja kahjustusi. Külmakindel betoon on konstrueeritud nii, et see minimeeriks külmakahjustusi ja säilitaks oma struktuurilise terviklikkuse.
2. Pikem eluiga – külmakahjustuste vältimine võib suurendada betoonkonstruktsioonide eluiga. Külmakindla betooni kasutamine aitab vähendada vajadust remondi ja hoolduse järele.
3. Ohutus – külmakahjustuste põhjustatud praod võivad vähendada konstruktsiooni tugevust ja ohustada selle stabiilsust. Seega aitab külmakindel betoon tagada konstruktsiooni ohutust ja vastupidavust.
4. Kulude kokkuhoid – külmakindel betoon vähendab vajadust sagedaste remondi- ja hooldustööde järele, seega see aitab kaasa kulude kokkuhoiule.
5. Töökindlus – külmakindlus on eriti oluline piirkondades, kus esineb regulaarseid külmumis- ja sulamistsükleid. Külmakindel betoon tagab, et konstruktsioon säilitab oma tugevuse ja vastupidavuse erinevates kliimatingimustes.

1.2.2 Külmakindla betooni vajalikkus

Teede, sildade ja muude infrastruktuurielementide betoonkonstruktsioonid peavad olema külmakindlad, kuna need puutuvad sageli kokku külmumis- ja sulamistingimustega. Tee-ehituses peaks sisuliselt olema iga betoonehitus külmakindel.

Betooni külmakindluse tagamine on kriitilise tähtsusega, et vältida kahjustusi ja tagada pikaajaline vastupidavus. See kehtib eriti konstruktsioonides, kus esineb külmumis- ja sulamistingimusi või muid kliimategureid, näiteks sademeid, mis võivad betoonkonstruktsioone kahjustada.

1.2.3 Külmakahjustused

Betooni külmakindlus sõltub avatud pooride hulgast – nende kaudu tungib vesi betooni sisemusse. [8] Külmumise ja sulamise tulemusena tekib betooni struktuuris erinevaid kahjustusi, mis mõjutavad omakorda betooni vastupidavust. Betooni külmakahjustusi võib selgitada kahel viisil. Esimene teoreetiline lähenemine betooni külmakahjustuste mõistmiseks on hüdrauliline surve või jäätuva vee mahumuutus. [6] Betoon sisaldab kivinemisel alati vaba vett kapillaarsüsteemis. [19] Betoonis olev vesi, eriti vaba vesi, mis ei reageeri sideainega, hakkab külmudes paisuma, mis võib põhjustada survet ja pragusid betoonis. See protsess on ajas kulgev ning võib viia betooni struktuuri nõrgenemiseni. Praod loovad teed niiskusele ja teistele kahjulikele ainetel, mis tungivad betooni sisse, kiirendades edasisi kahjustusi. Külmakahjustused võivad põhjustada nii koorumist kui ka tükide eraldumist, tekitades ebasoodsa betooni pinna ja lühendades betoonkonstruktsiooni eluiga. [6] [20] Teine lähenemine räägib poorides liikuvast veest tingitud sisepingetest, kus vee liikumine betoonis põhjustab pinget ja pooride kahjustusi. [19] Lisaks sõltub vee külmumistemperatuur lahuse kontsentratsioonist, näiteks soolalahuse puhul. Suurema soolasisaldusega piirkondades tekib rõhk, mis võib lõhkuda poori struktuuri. Betooni külmakindluse parandamiseks tuleb leida viise vee liikumise vähendamiseks ja poorsuse kontrollimiseks. [6]

Betooni poorsuse vähendamine näiteks vesi-tsementteguri (edaspidi v/ts) suhte vähendamise teel on tõhus meetod, kuid tuleb arvestada ka teiste teguritega, nagu betooni kiire jahtumise mõju. Betooni poorsuse vähendamise mõju võib mõista ka Darcy seaduse kaudu, mis näitab, et vee liikumine kapillaarpoorides avaldab survet selle seintele, sõltudes voolu kogusest, voolutee pikkusest ja poorse keskkonna läbilaskvusest. [19]

Külmakahjustused võivad ilmned pinnakahjustuste või sisemise pragunemisena. Sisemine kahjustus tekib vee külmumisel tsemendimördi, täitematerjali pooride ja pragude sees. [21] Pinnakahjustused võivad tekkida nii horisontaalsetel kui ka vertikaalsetel pindadel, eriti kohtades, kus vesi või lumi koguneb ja pind jääb niiskeks. Pinnakahjustuste tekkimise oht suureneb, kui kasutatakse lume- ja jää sulatamiseks

kemikaale, tavaliselt naatriumkloriidi lahuseid. See probleem esineb sageli teede- ja sillaehituse konstruktsioonidel. [22]

Külmumise-sulatamise tsükli tüüpilised tunnused võivad olla järgmised: betoonpinna koorumine ja ketendamine (vt Joonis 1.1);

- pinnakihi paralleelsed pragujooned;
- suured lahtised betoonpinna tükid, mida on palja silmaga näha;
- täitematerjali paljastumine ilma pragudeta;
- lõhed täitematerjali ümber. [23]



Joonis 1.1 Betooni koorumine külmakahjustuse tõttu [24]

Külmakahjustuste vältimiseks võetakse ehituspraktikas kasutusele mitmeid meetmeid, näiteks:

1. külmakindla betooni valimine, mis sisaldab lisandeid, mis aitavad vähendada veemavust ja suurendada külmakindlust;
2. betooni piisav tihendamine, mis võib vähendada vee sissetungimist betoonis ja kaitsta seda külmakahjustuste eest;
3. betooni nõuetekohased kivistumistingimused, mis võib pärast valamist vähendada pooride moodustumist ja vee sissepääsu;
4. ehituskonstruktsioonide kujundamisel külmakahjustuste ennetamine, näiteks vee äravoolusüsteemide projekteerimine ja ehitamine, nii, et sademed ei jääks seisma betoonpinnale;
5. regulaarne hooldus ja kontroll, mis võimaldavad õigeaegselt tuvastada ja parandada külmumise-sulatamise kahjustustele vastuvõtlikke piirkondi. [6] (vt peatükk 1.4)

Betooni külmakahjustuste vältimiseks on oluline järgida õigeid ehitustavasid ja valida sobivad materjalid vastavalt kliimatingimustele.

1.2.4 Betooni külmakindluse mõjurid

Betooni külmakindlust mõjutavad mitmed koostisosad, millel on oluline roll struktuuri vastupidavuses külmumisele ja sulamisele (vt Tabel 1.3).

Tabel 1.3 Betooni külmakindluse mõjurid [8]

Betooni koostis	Tehnoloogilised muutujad	Välised mõjurid
Vesitsementtegur	Järelhooldus	Õhuniiskus
Õhusisaldus	Tihendamine	Temperatuurid
Lisandid	Transport	Jäätumisvastased vahendid
Täitematerjali valik	Betooni kaitsmine	Karboniseerumine
Tsemendi valik		
Koostiskomponentide vahekorrad		

Mida madalam on v/ts , seda vähem on vaba vett, mis võib külmuda ja põhjustada betooni kahjustusi. [25] Peentäitematerjalid aitavad vähendada betooni pooride suurust ja suurendada tihedust, mõjutades seeläbi külmakindlust positiivselt (vt peatükk 1.3.2). [26] Teatud lisandid võivad aidata vähendada betooni külmumist ja sulamist, sisaldades õhumulle moodustavaid aineid, mis leevendavad külmakahjustusi. [24] Seega on oluline valida õiged koostisosad ja optimeerida nende suhted, et tagada betooni vastupidavus külmakahjustustele.

1.3 Betooni koostisosade mõju külmakindlusele

Betooni struktuur on mitmekesine, koosnedes tsementkivist ruumilisest karkassist, mille vahel paiknevad erineva suuruse ja kujuga täitematerjali osad, nagu liiv, killustik ja kruus. Tsemendikivis esineb hajusalt orienteeritud mikro- ja kapillaarpoore, kus leidub vaba vett, veeauru ja õhku. [27] Vaba vee negatiivne mõju on see, et kuivamisel jäävad betooni poorid, mis soodustavad edasisi kahjustusi.

Lisaks betooni sisemisele struktuurile mõjutavad selle omadusi ka koostisosad ja segu omadused kolmel viisil. Esiteks, need mõjutavad betooni vastupidavust külmumisele ja sulamisele ning seega ka selle reaktsiooni külmumis- ja sulamistsükklitele. Teiseks, need

võivad mõjutada õhu manustamise protsesse ja pooride struktuuri betooni segamise ja paigutamise ajal, ning seeläbi otseselt mõjutada betooni vastupidavust mikropragunemisele, mis võib tekkida külmaga seotud tingimustes. Kolmandaks, need võivad mõjutada betooni vastupidavust jääsulatamise soolade tekitatud pindmisele pragunemisele. Seega on oluline arvestada betooni omadusi ja vastupidavust tagades nii selle sisemise struktuuri kui ka koostisosade ja segu omadused. [6]

1.3.1 Täitematerjalide mõju betooni külmakindlusele

Betooni skeleti, umbes 75% betooni mahust, moodustavad jämedad ja peened täitematerjalid. [6] Täitematerjalidel on oluline roll betoonis: annavad tugevusomadused ja vähendavad tsemendi mahukahanemise mõju. Jämetäitematerjalide ülemine terasuurus on $D \geq 4$ mm ja alumine $d \geq 2$ mm. Jämetäitematerjaliks liigitatakse kruusa või killustikku. [28] Suuremate terakestega täitematerjalid võivad jätta betooni suuremaid tühimikke või poorsemaid alasid, mis võimaldavad rohkem õhku betooni sisse tungida või koguneda. Vastupidi, peenemad täitematerjalid võivad moodustada tihedama struktuuri, mis piirab õhu liikumist betoonis. Mida väiksem on maksimaalne terasuurus, seda suurem on vajadus õhu järele, et tagada betooni külmakindlus. [19]

Kivimite vastupidavus külmumisele sõltub mitmest tegurist, sealhulgas veeimavusest, pooride struktuurist ja kivimi omadustest. [6] [7] [29] [30] Täitematerjalide veeimavust katsetatakse vastavalt standardile EVS-EN 1097-6, mille kohaselt on täitematerjal külmakindel, kui veeimavus jääb alla 1%. [31] Siiski on täitematerjale, millel on veeimavus suurem ning mis vastavad siiski külmakindluse kriteeriumitele. Külmakindlust saab sellisel juhul hinnata standardite EVS-EN 1367-1 või EVS-EN 1367-2 kohaselt. Standardis EVS-EN 12620 on välja toodud täitematerjali külmakindluse kategooriad massikao kohta. Samuti on võimalik täitematerjalide külmakindlust tõestada betooni katsekehade külmakindluse määramisel. [32]

Täitematerjalide pooride mõõtmed sarnanevad suuremate kapillaarpooride mõõtmetega, kuid võivad varieeruda laias ulatuses. Betooni pooride jaotust ei saa lihtsalt hinnata tsemendipasta ja täitematerjalide pooride liitmise teel, kuna täitematerjalid mõjutavad tsemendipasta poorsust. Tsemendipasta ja täitematerjali vahelisel liidesel on üleminekutsoon, kus poorsus on üldiselt suurem kui tsemendipastas. Täitematerjalid võivad ise olla külmumistundlikud ning korduvate külmutamis- ja sulatamistsüklite korral puruneda. Samas võivad täitematerjalid, mis

külmumisega hästi hakkama saavad, tekitada probleeme, kui nad vabastavad palju vett külmutamise ajal, mis paneb betooni sees survet tekitama. [6] Madala külmakindlusega ehk suure veemavusega täitematerjali kasutamisel on oluline vähendada tera suurust, kasutada kuiva täitematerjali ja eemaldada sobimatu kujuga (nt plaatjad ja nõeljad) terad. Väiksemate killustiku terade korral peab külmakindlas betoonis õhusisaldus olema suurem. [7]

Kivimid, millel on suur veemavus ja kõrge elastsusmoodul, on vähem vastupidavad külmakahjustustele. See tähendab, et kui kivimi poorid ei lase veel hästi liikuda ja kivimi struktuur ei suuda veekülmutusest tingitud deformatsiooniga kohaneda, on kivim tundlik külmakahjustustele. Täitematerjalidel on võime vett imada ja hoida. Õige täitematerjalide valik võib aidata reguleerida betoonis oleva vee kogust, mis omakorda võib mõjutada betooni külmakindlust. Liiga palju vett võib suurendada külmumise ohtu ja halvendada betooni vastupidavust. [30] Betoonidel, kus jämeda täitematerjali sisaldus on madalam, on väiksemad poorid ning see tähendab omakorda paremat külmakindlust.

Uuringutest [17] selgus, et betoonis olevate pooride suurust ei mõjutagi otseselt jämeda täitematerjali tüüp, vaid kogus. See tähendab, et erineva jämeda täitematerjalide kontsentratsiooniga betoonidel võib olla sama pooride suuruse jaotus. Katsetulemused näitasid veel, et mida rohkem on suletud poore, seda suurem on külmakindluse faktor. [17]

Uuringust [33] selgus, et võrreldes tardkivimiga on lubjakivi märgatavalt tundlikum sulamis-külmumis tsüklite suhtes, eriti kui sellesse protsessi on kaasatud kloriidid. Üksnes selles uuringus tehtud külmakindluskatse 1% NaCl lahuses näitas märkimisväärset erinevust tardkivi ja lubjakivi vahel (massikadu tardkivil külmutuskatsel destilleeritud vees 0,1% ja soolvees 0,1%; lubjakivil vastavalt 1,1% ja 75%). Seega tuleks külmakindluse tagamisel valida sobilik täitematerjal. Lubjakivi külmakindlus on nõrgem, sest lubjakivi sisaldab kerget ja poorset kivimit. [34] Võrdluseks saab tuua, et tardkivimite tihedus on 2550 kuni 2700 kg/m³ ning külmakindlus 200 tsükli, lubjakivil on tihedus 1800 kuni 2700 kg/m³ ning külmakindlus 15 kuni 35 tsükli. [28]

Jämedad täitematerjalid võivad oluliselt mõjutada betooni külmakindlust, kuid peened täitematerjalid tavaliselt seda ei tee. Peentäitematerjalide vastupidavus tuleneb peamiselt nende väiksusest, mis jääb tavaliselt alla kriitilise suuruse, millest üle jääva vee põhjustatud rõhud ületavad täitematerjali tõmbetugevuse. (vt peatükk 1.3.2)

Jämetäitematerjali suurus tavaliselt ei mõjuta õhu kaasahaaramise mehhanisme, kuigi mõnikord võib peentäitematerjali suurus õhu kaasahaaramist mõjutada. Valesti projekteeritud betoonisegud võivad halva klassifikatsiooni valiku või ebapiisava suhte tõttu peen- ja jämetäitematerjali vahel kaudselt mõjutada betooni külmakindlust, põhjustades eraldumist tsemendikivist. [6]

1.3.2 Peentäitematerjalide mõju betooni külmakindlusele

Betoonis kasutatakse peenäitematerjalina inertseid looduslikke kivimeid, nagu kvartslüiv, või kunstlikke materjale, näiteks kergkruus. Peentäitematerjal võib olla pärit looduslikust kivimite või kruusa murenemisest või tehislisest töötusprotsessidest. Peentäitematerjal on sõmer materjal, mille terasuuruse ülemine piir on alla 4 mm. Kasutatakse nii looduslikke kvartslüivu kui ka kunstlikke liivfraktsioone, näiteks kergkruusa liivfraktsiooni. [28]

Peenem liiv vähendab õhu lisandi toimet segus, kuna peenem liiv nõuab suuremat vee sisaldust ja suurem vee kogus tekitab suurema lisandi vajaduse. Kui lisada rohkem vett, siis suureneb ka pooride kogus ning väheneb külmakindlus. Kuid õiges koguses peenliiv ei ole halb külmakindlusele. [26] Peenema täitematerjali kasutamisel suureneb nii materjali eripind kui ka tsemendi vajadus, kuna peenem liiv nõuab rohkem tsemendi osakeste sidumiseks ja soovitud tugevuse saavutamiseks. Sellega kaasneb ka suurem vee kogus, kuna tsement reageerib veega, moodustades betooni. Siiski, kui tsemendi kasutatakse liiga palju, võib see mõjutada betooni lõpptulemust ebasoodsalt. Liiga suur tsemendikogus võib muuta betooni segamise keerukamaks, suurendada mahukahanemist ja pragunemise ohtu ning vähendada selle vastupidavust. Suurema peentäitematerjali sisaldusega betoonides võivad poorid olla väiksemad ja tihedamalt paigutatud, mis võib parandada betooni külmakindlust. Seetõttu on oluline leida optimaalne tasakaal täitematerjali, tsemendi ja vee vahel, et tagada betooni sobivad omadused, sealhulgas külmakindlus. [35]

Rice'i ülikooli teadlaste uuring näitas, et grafeen, mida toodetakse metallurgilisest koksist, võiks olla alternatiiviks liivale betoonis. Selle avastuse kohaselt on grafeeniga asendatud betoon 25% kergem, kuid sama tugev kui traditsiooniline betoon. Uuringutest selgus, et grafeenipõhine betoon vastab standardse betooni mehaanilistele omadustele. Arvestades betooni suurt tarbimist maailmas ja kasvavat liivakriisi, võiks see tehnoloogia aidata kaasa jätkusuutlikumale linnakeskkonna arengule vähendades loodusliku liiva kasutamist ja betoontööstuse süsinikdioksiidi heitmeid. [36]

1.3.3 Tsemendi mõju betooni külmakindlusele

Tsementkivi enda struktuur on samuti mitmekesine, sisaldades elastset kristallvõret ja viskoosset geeli, mis võivad aja jooksul muutuda ning mõjutada betooni omadusi. Pikaajalised protsessid, nagu vaba vee kuivamine ja geeli tihenemine, võivad kesta mitmeid aastaid, põhjustades betooni mahukahanemist ja tugevuse suurenemist. Kuigi on teada, et betooni struktuur ja omadused on omavahel seotud, on nende seoste täpne olemus veel täielikult selgitamata. [27]

Betooni valmistamisel reageerivad tsement ja vesi omavahel ja moodustavad kõvastunud pasta, mis seob jämedaid ja peeneid täitematerjale. [23] Alguses täidetakse tsemenditerade vahele jäävad tühimikud veega, mida nimetatakse kapillaarpoorideks. Tsementkivi sisaldab mitmesuguseid poore, sealhulgas kapillaarpoore ja geelipoore, mis mõjutavad betooni struktuuri ja omadusi. Kapillaarpooride suurus ja arv sõltuvad mitmest tegurist, sealhulgas v/ts -i ja tsemendi hüdratatsioonistmest. Mida madalam on v/ts , seda väiksemaks muutub kapillaarpooride arv, mis omakorda mõjutab betooni tihedust ja vastupidavust külmakindlusele. Geelipoorid moodustavad olulise osa betooni struktuurist, adsorbeerides vett ja mõjutades betooni käitumist erinevates keskkonnatingimustes. [4]

Üks oluline tsemendi mõju mehhanism betooni külmakindlusele on seotud hüdratatsiooni kiirusega. Tsemendi keemiline koostis ja füüsikalised omadused mõjutavad hüdratatsiooni kiirust, mis omakorda mõjutab poorsust ja hüdratatsiooniproduktide jaotumist kapillaarpoorides. [6] Kiire hüdratatsiooni kiirus võib olla kasulik lühikese perioodi jooksul kvaliteetse tsemendipasta saamisel, eriti betoonide puhul, mis on külmumis- ja sulatamistsüklitele avatud. [6]

Väliskeskkonnas kivinevas betoonis on kapillaarpoorides vesi, mis ei reageeri tsemendiga, kuna tsement suudab keemiliselt siduda ainult 23–25% vett oma kaalust. Kapillaarpoorides olev vesi külmub juhul, kui temperatuur langeb alla 0 kraadi, põhjustades vee paisumise ja pingete tekkimise kapillaarpooride seintele, mis omakorda tekitavad kahjustusi betooni struktuurile. [24] Tsemendi mõju kapillaarpooridele on seotud ka selle peensusega. Peenema tsemendi jaotus loob väiksema koguse külmutavat vett ja vähendab pasta läbilaskvust, mis omakorda vähendab betooni vastuvõtlikkust külmumisele ja sulamisele. Seega võib öelda, et ühtlaselt ja väikeseid kapillaarpoore omav betoon avaldab positiivset mõju betooni külmakindlusele. [6] [34]

Lisaks tsemendi füüsikalistele omadustele mõjutavad betooni külmakindlust ka tsemendi keemilised omadused. Näiteks erinevad tsemenditüübid, nagu

portlandtsement, sulfaadikindel tsement ja portlandtsemendi ning putsolaantsementide segud, omavad erinevat koostist ja omadusi, mis võivad mõjutada betooni külmakindlust, eriti kui betoon puutub kokku agressiivsete keskkondadega, nagu külmumis- ja sulatusprotsessid. Näiteks portlandtsemendil on üldiselt hea külmakindlus, kuid selle omadused võivad sõltuda konkreetsest tootjast ja tootmismeetodist. Sulfaadikindel tsement on loodud keskkondade jaoks, kus esineb suurenenud sulfaatide sisaldus, kuid võib olla vähem vastupidav külmumis- ja sulatusprotsessidele. Putsolaantsementide lisamine segusse võib parandada betooni külmakindlust, vähendades pooride suurust ja suurendades vastupidavust, kuid selle mõju võib varieeruda sõltuvalt putsolaani tüübist ja kogusest. [37]

Tsemendi valik võib mõjutada ka betooni külmakindlust mitmel viisil, sealhulgas selle koostise, klinkeri mineraalse koostise, lisandite ja modifikaatorite ning erinevate tsemenditüüpide omaduste kaudu. Seega on oluline valida sobiv tsement, et tagada betooni optimaalne külmakindlus vastavalt keskkonnatingimustele, milles betoon kasutatakse. [38] Standardis EVS-EN 206:2014+A1:2021 [10] on välja toodud minimaalse tsemendi hulk vastavalt külmakindluse klassile (vt Tabel 1.4). Esitatud soovitatavad väärtused põhinevad CEM I 32,5N tsemendi piinormidel. Eestis eelistatakse tavaliselt kasutada 42,5 ja 52,5 tugevusklassiga tsemente.

Tabel 1.4 Betooni koostisele ja omadustele esitatavad nõuded [10]

Külmakindluse klass	XF1	XF2	XF3	XF4
Max v/ts	0,55	0,55	0,50	0,45
Min tugevusklass	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Min tsemendi sisaldus, kg/m³	300	300	320	340
Min õhusisaldus, %	-	4,0	4,0	4,0
Muud nõuded	Piisava külmumis-/sulamikindlusega, standardile EN 12620 vastav täitematerjal			

1.3.4 Lisandite mõju betooni külmakindlusele

Betooni valmistamisel kasutatakse erinevaid lisandeid, näiteks plastifikaatoreid ja superplastifikaatoreid, mis vähendavad veevajadust, parandavad töödeldavust ning võimaldavad isevalguga betooni tootmist. Lisaks kasutatakse õhku manustavaid lisandeid külmakindluse parandamiseks, tardumise kiirendajaid või aeglustajaid ja kivinemise kontrollimiseks ning külmumist takistavaid lisandeid, et ennetada värsket betoonisegu külmumist külma ilmaga. [28]

Näiteks kuumade ilmade tulemusena võib betooni liiga kiire kivinemine põhjustada pragunemist ja halva pinna teket. Lisaks võib see mõjutada betooni tugevust ja vastupidavust ning vähendada selle töödeldavust ja töökindlust. Seega on oluline aeglustada betooni tardumist või kivinemist, et tagada korralik valamine, vähendada pragunemise riski ning tagada valminud konstruktsiooni kvaliteet ja vastupidavus.

Lisandite tüübid:

- Plastifikaatorid – vähendavad betoonisegu veevajadust või suurendavad töödeldavust.
- Superplastifikaatorid – suurel määral veevajadust vähendavad või töödeldavust suurendavad lisandid.
- Õhku manustavad lisandid – annavad betoonile suurema külmakindluse.
- Veehoidvust tõstvad lisandid – hoiavad ära vee väljavalgumise betoonisegust.
- Tardumist kiirendavad ja aeglustavad lisandid – reguleerivad betoonisegu tardumisprotsessi.
- Kivinemist kiirendavad lisandid – kiirendavad betooni tugevuse saavutamist madalal temperatuuril.
- Tardumist aeglustavad lisandid – kasutatakse betooni transpordil pikkade vahemaade ja kuumade ilmade korral.
- Komplekslisandid – omavad mitut omadust korraga.
- Peenlisandid – mineraalne peenmaterjal, kasutatakse betooni omaduste parandamiseks. [19] [28]

Plastifikaatorid on lisandid, mille eesmärk on parandada betooni töödeldavust ja plastilisust, muutes selle voolavamaks, et hõlbustada paigaldamist. [19] Plastifikaatorite mõju betooni külmakindlusele võib olla mitmekesine, kuid see sõltub suuresti konkreetsest plastifikaatorist ja selle koostisosadest. Antud lisandi kasutamisel kaasneb õhumullide teke betoonisegus, mis omakorda mõjub positiivselt betooni külmakindlusele. [19]

Siiski võib liigne plastifikaatori kasutamine kaasa tuua mitmeid negatiivseid mõjusid. See võib mõjutada betooni löplikku tugevust, eriti juhul, kui plastifikaatorit kasutatakse liiga palju. Samuti võib plastifikaator muuta betooni segamise aega, nõudes hoolikat doseerimist ja segamist. Liigne õhu sisaldus, mille plastifikaatorid võivad põhjustada, võib omakorda mõjutada betooni külmakindlust, eriti juhul, kui õhumullid ei ole ühtlaselt jaotunud. Seega on oluline plastifikaatoreid õigesti doseerida, võttes arvesse betooni konkreetset kasutust ja nõudeid. Lisandite efektiivsus sõltub sellest, millal need segule lisatakse. Praktika põhjal võib väita, et näiteks plastifikaatori lisamine segamise lõppfaasis on palju toimivam. [19]

Kui superplastifikaatoreid kasutatakse nii, et v/ts jääb muutumatuks, siis külmakindlus ei muutu. Enn Uustalu on välja toonud, et superplastifikaatorite abil külmakindluse tõstmine ei ole ka eriti tulus, vaid pigem soovib ta kasutada selleks õhku manustavad lisandeid. Sellisel juhul tuleb tähele panna seda, et nende lisandite koos kasutamisel võib õhku manustava lisandi vajalik hulk suurenedada efektiivsuse tagamiseks. [19]

Nagu eelnevalt mainitud, siis õhku manustavate lisandite kasutamine betoonisegus aitab luua struktureeritud pooride kogumeid, mis säilivad ka betooni kivinemisel. Õhku manustavate lisandite eesmärk on külmakindluse parendamine. [19] Õhku manustavate lisandite eesmärk ei ole õhumullide tekitamine, vaid peamiselt nende stabiliseerimine ja eraldatuna hoidmine, et vahekaugused oleksid korrapärasemad. [2] [24] [39] Lisaks tekitavad need juurde mikroskoopilisi õhumulle, mis mõjuvad efektiivselt betooni külmakindlusele. [24] Õhu lisamine betooni on kasulik nii värske kui ka kivistunud betooni korral. Lisaks töödeldavuse ja külmakindluse parandamisele, mõjutavad õhulisandid positiivselt betooni vastupanuvõimet sulfaatidele. [40]

Enim mõjutab külmakindlust pooride paigutustegur, mida saab parandada õhku manustava lisandiga, mis tekitab struktureeritud poorsuse betooni segusse. [2] Kui paigutustegur on alla 0,20 mm, siis on üldiselt betoon külmakindel. Karmimates tingimustes, kus on kõrged külmakraadid, on vaja betoonisegus väiksemaid ja tihedalt asetsevad õhumulle. [2] [13] [41] [42]

Õhku manustavatel lisanditel võib olla ka negatiivne mõju, kui kasutada neid liigselt, arvestamata teiste täitematerjalide koosmõju. Ülemäärane õhu lisamine võib vähendada betooni tugevust. Seetõttu on oluline säilitada õhu sisaldus tasakaalus, et mitte ohverdada liiga palju tugevust. Lisaks võib suurem õhu sisaldus vähendada betooni kulumiskindlust, eriti rasketes liiklustingimustes. Liigne õhu lisamine võib suurendada betooni v/ts suhet, mis võib omakorda mõjutada selle tugevust ja

vastupidavust. [2] [19] Seega on õhku manustavate lisandite kasutamine tasakaalu küsimus, kus tuleb arvesse võtta betooni spetsiifilist kasutust ja nõudeid.

1.3.5 Seguvee mõju betooni külmakindlusele

EVS-EN 1008:2002 kohaselt omab kasutatava vee kvaliteet betooni valmistamisel suurt tähtsust. Betooni tootmisel kasutatav vesi ei tohi sisaldada betoonehitisele kahjulikke aineid. [37] Kvaliteet mõjutab betooni tardumisaega, sarruse korrosioonikaitset ning betooni kivistumise kiirust. Kõige sobivamaks peetakse joogivee kasutamist betoonis ning seda ei ole vaja eraldi katsetada sobivuse kinnitamiseks.

Vesi täidab betoonisegus mitmeid olulisi funktsioone. Vesi osaleb tsemendi ja teiste sideainete keemilises reaktsioonis, mis viib betooni kõvenemiseni ja tugevnemiseni. Õiges koguses lisatud vesi muudab betooni segu plastilisemaks ja töödeldavamaks, hõlbustades selle paigaldamist ja vormimist. Lisaks on vesi hädavajalik tsemendi hüdratatsiooni protsessis, mis toob kaasa tsemendi kristallide moodustumise ja betooni tugevuse arengu. [37]

Seguvee mõju õhulisele betoonile sõltub oluliselt kasutatud vee kogusest. Liiga palju vett võib põhjustada üleliigset tsemendi hüdreerumist ja poorset struktuuri, mis võib halvendada betooni tugevust ja vastupidavust külmumisele ja sulamisele. [40]

1.3.6 Õhu mõju betooni külmakindlusele

Betoonisegudes on alati õhk, mis on lisatud tahtlikult või juhuslikult segamise protsessis. Õhk on betoonis väikeste mullidena, mis võivad liikuda ja kuju muuta. Nende suurus ja kuju varieeruvad mikroskoopilistest õõnsustest suurte gaasimullideni. [43] Kivistunud betoonis jäävad õhumullid paika, moodustades õhutühimikud ehk poorid. Õhutühimike kogumit nimetatakse pooride süsteemiks, mis toimib kaitsekihina, vähendades vee kogust, mis saaks külmuda ja põhjustada betoonis sisemisi pingeid ning pragusid. [6] [40] [43]

Nagu eelnevalt selgitatud, siis betooni vastupidavus sõltub pooride struktuurist ja suurusest. Poorid jagunevad nelja tüüpi: geelipoorid, kapillaarpoorid (5–5000 µm), manustatud õhust ja kaasatud õhust. Geelipoorid ei mõjuta betooni tugevust, kuid

mõjutavad nihet ja kokku tõmbumist. Kapillaarpooride rohkus ja muud jämedad poorid vähendavad betooni tugevust. Avatud poorid ja kapillaarid, mis tekivad vaba vee aurustumisel, halvendavad betooni külmakindlust. Betooni külmakindlust mõjutavad avatud poorid ja kapillaarid, mis suurenevad v/ts -i suurenemisel. Avatud kapillaarpoorid tekivad vaba vee eraldumisel betooni kivinemise ajal ehk kuivab välja. Mida rohkem vett kasutatakse betoonisegus, seda rohkem jääb seda sidumata, ja seega suureneb kapillaarsete pooride hulk veeaurustumise käigus. Seetõttu parandab madal v/ts mitte ainult betooni tugevust, vaid ka selle vastupidavust ja taluvust külmumise-sulamise tsüklitele. [12]

Õhu lisamine tähendab teadlikku õhu lisamist betoonile spetsiaalse lisandiga, erinedes sellega betooni juhuslikult lõksu jäänud õhust, kuna selle läbimõõt on palju väiksem. (vt peatükk 1.3.4). [39] Optimaalse külmakindluse saavutamiseks on oluline kujundada mikrostruktuur, tagades maksimaalse osaluse geeli- ja õhutühimikest suurusega 0,1–0,2 μm . Kuigi Euroopa standardid ei sisalda suuniseid õhutühimike pinna kohta, mis on oluline betooni külmakindluse kujundamisel, on see siiski oluline aspekt. Lisades betooni õhku, muutuvad mullid väiksemaks ja jäävad betooni sisse ning moodustavad struktureeritud poorsuse. [44] Kui õhumullid asetsevad korrapäraselt ning väikeste vahekaugustega, siis on see betoonile kasulik. [6] [44] [43]

Väikesed ja ühtlaselt jaotunud õhumullid on betoonile head, kuna need võimaldavad vähema vee kasutamist segus, mis parandab betooni töödeldavust ja külmakindlust. [43] Vesi paisub külmumisel ning vees tekkiv rõhk suureneb võrreldes vahemaaga, mis peab lähima õhumullini jõudmiseks läbima. Järelikult, mida tihedamalt on õhupoorid asetsetud betoonis, seda väiksem on tõenäosus, et külmunud vee rõhk kahjustab betooni. [6] [8] [40] [45] Seega, lisatud õhk parandab betooni paindetugevust ja vastupidavust külmakahjustustele ning suurendab betooni vastupidavust külmumis-sulamistsüklitele, tagades seeläbi betooni pikema eluea ja parema jõudluse. [6] Suuremad mullid on tavaliselt niikuinii betoonis olemas, olenemata lisandite kasutamisest. Suured poorid mõjutavad betooni tugevust negatiivselt. Selleks, et suuremad õhumullid eemaldada, tuleb värsket betooni hästi tihendada (vt peatükk 1.4). [43]

Betoonis olevat õhku mõjutavad veel täitematerjalid. Tera suuruse kahandamine toob kaasa suurema õhu vajaduse selleks, et saavutada külmakindel betoon (vt peatükk 1.3.1). Tähtsaks mõjutajaks on ka betoonisegu segamise kiirus ja aeg (vt peatükk 1.4). Protsess peab olema ühtlane ning täpse pikkusega. Liigne segamine võib tekitada olukorra, kus õhumullid lähevad betoonisegust välja või tekitab neid liiga palju. Sama

olukord võib tekkida betoonisegu tihendamisel. Juhul, kui betoonis suurendatakse tsemendi mahtu, siis tuleb betooni vähem õhku manustada. V/ts suhte suurendamine tõstab samuti õhu kogust betoonis ning suurendab poore ja pooride omavahelist kaugust (vt peatükk 1.3.7). [24]

Uuringute [40] tulemused näitavad, et külmakindlat betooni iseloomustab sealolevate õhupooride vahekaugus, mis sõltub eelkõige v/ts-ist ning külmakindluse klassist. Suurenev v/ts suhe suurendab õhulisaldust, eriti vahemikus 0,40 kuni 1,0, kus õhulisaldus võib kasvada üle nelja protsendi. Betooni konsistents mõjutab samuti õhulisaldust, suurenenud konsistents näitab vee sisalduse suurenemist. Õhulisaldus suureneb ka konsistents suurenemisel, isegi konstantse v/ts-i korral. [40]

Erinevates allikates on väljatoodud betooni õhusisaldus. Näiteks Transpordiameti koostatud „Teetööde tehniline kirjeldus“ ütleb, et õhusisaldus betoonidel on nõutud vahemikus 3,5%–7,0%. [1] Raamatus „Beton ja Raudbetoon. Spetsifitseerimine, tehnoloogia, kvaliteet, vastavushindamine“ on minimaalne õhusisaldus 4%. [46] Standardi EVS-EN 206:2014+A1:2021 [10] õhusisalduse soovitus XF4 klassile on samuti 4,0% (vt Tabel 1.4). Kokkuvõttes, kui tootja on tõestanud, et teatud õhusisaldusega betoon on külmakindel, siis on selline õhusisaldus lubatud, ehk betoonitööstuses määratleb külmakindluse alampiiri tootja.

1.3.7 V/ts suhte mõju betooni külmakindlusele

Betooni koostises omab olulist rolli v/ts. V/ts mõjutab kapillaarpooride süsteemi omadusi, sealhulgas nii pooride mahtu kui ka suurusejaotust. [6] V/ts suhe mõiste seisneb selles, et see on vee ja tsemendi massisuhe segus. Suhe on otseselt seotud tsemendiosakeste omavaheliste kaugustega. Kui need kaugused on väiksed, ehk v/ts on madal, viitab see suuremale betooni tugevusele ja üldiselt ka paremale külmakindlusele, kuna sellega kaasneb vähem vett betoonis, mis võimaldab tekitada vähem avatud poore. [25] [24] [19]

Suurem v/ts tähendab, et tsemenditerad on üksteisest kaugemal, jättes osa vahemaast hüdratatsiooniproduktidega täitmata. Väiksem v/ts toob aga tsemenditerad lähemale ning suurendab suuremate pooride mahtu, samas kui väiksemate kapillaaride suurusjaotus jääb enamasti samaks. [6] Selleks, et saada betooni, mille v/ts on väiksem, on mõistlik kasutada lisandeid, mis parandavad betoonisegu plastilisust ja võimaldavad vee kogust vähendada. [19]

Sellised muutused mõjutavad betooni vastupidavust külmumis- ja sulamistsüklitest tingitud sisemistele pragudele. V/ts -i vähendamine kahandab külmutava vee hulka ja tsemendipasta läbilaskvust ning suurendab mehaanilist vastupidavust, mis omakorda suurendab betooni külmakindlust. Kuid läbilaskvuse vähenemine võib olla kahjulik, kuna see suurendab sisemiste rõhkude teket, mida põhjustab vee liikumine kapillaarides külmumise ajal. Oluline on tasakaalustada v/ts suhet, et tagada betooni vastupidavus sisemistele pragudele. Kõrge v/ts soodustab lahustunud soolade sissepääsu ja suurendab pinnakihtide küllastumist, mis võib olla eriti kahjulik külmatundlike täitematerjalide korral. Seetõttu on tavapärase piirata v/ts suhet maksimaalse väärtusega 0,45 betoonide puhul, mis puutuvad kokku jäätõrjekemikaalidega. Väiksem v/ts suhe tagab ka hea mehaanilise vastupidavuse, mis on oluline betooni vastupidavuse seisukohalt. [6] EVS-EN 206:2014+A2:2021 standardi kohaselt on maksimum nõutud v/ts suhte väärtused välja toodud eespool (vt Tabel 1.4). [10]

1.4 Betooni valmistamise ning järelhoolduse mõju külmakindlusele

Betooni valmistamise protsess mõjutab oluliselt betoonis olevat õhku ja selle külmakindlust. Segamisaeg ja -kiirus mõjutavad õhu sisaldust, kuna segamise ajal lisandub betooni õhk, eriti kui kasutatakse õhku manustavat lisandit või kui õhk siseneb segu segamise ajal. Lisaks mõjutab betooni kvaliteeti betooni transport ja paigaldamise meetod. [6]

Tähelepanu tuleb juhtida ka sellele, et betoonisegu segamise aeg peab olema umbes 1,5 korda pikem, kui on kasutatud lisandeid. Üldiselt võib betoonisegu pooride kvaliteet olla objektil parem kui tehases. Segumasinaga transporditud betoon võib olla parema kvaliteediga, kuna see segab segu pidevalt ja ühtlaselt, tagades ühtlase koostise ja vähendades võimalikke segregatsiooni probleeme. Samas võib pikaaegne transport ning vibratsioon vähendada segusse lisatud õhu hulka. [19] Mõned segumasinad võivad olla varustatud temperatuuri kontrollsüsteemidega, mis võimaldavad hoida betooni optimaalset temperatuuri, eriti külmades tingimustes. See võib vähendada külmakahjustuste riski. [37]

Betooni kividamine sõltub temperatuurist ehk mida madalam temperatuur, seda aeglasemalt betoon kividab. [47] Kuumadel temperatuuridel betoneerimisel võib kiirem kividamisprotsess mõjutada betooni pooride struktuuri ja jaotust. Kiire kividamine võib põhjustada pooride ebaühtlast jaotust ning suurema koguse väiksemate pooride teket betoonis. See võib omakorda mõjutada betooni tihedust ja vastupidavust ning suurendada pragunemise riski, eriti kui betooni pinnalt aurustub vesi kiiresti, jättes järele lisapoorid. [48]

Suurema tsemendi hulga kasutamine suurendab pragunemisohtu, eriti kuuma ilmaga, kuna suuremad temperatuurid soodustavad kiiremat vee reageerimist tsemendiga. Suuremad temperatuurid kiirendavad niiskuse kadu betoonist, luues soodsama keskkonna tsemendi ja vee kiirenenud reaktsiooniks ning kiirendades kividamisprotsessi. [47] Kuuma ilmaga betoneerimisel tuleb eriti tähelepanu pöörata täitematerjalide kuivusele ja poorsele struktuurile. [49]

Külmadel temperatuuridel betoneerimisel on betooni omadustele positiivseid mõjusid. Temperatuuri langemisel väheneb betooni veevajadus töödeldavuse saavutamiseks ning töödeldavuse kadu aeglustub, mis pikendab betooni töödeldavat aega. Külmadel temperatuuridel betoneerimisel võib aeglustunud kividamisprotsess samuti mõjutada betooni pooride struktuuri. Pikem töödeldav aeg võimaldab betoonil paremini settida ja vett välja tõrjuda, mis võib viia suurema ja ühtlasema pooride struktuurini. Samas võib külmumise oht tekitada lisapooride teket betoonis, eriti kui betooni temperatuur langeb liiga madalale ja vesi jääb, paisudes poorides. Madalatel temperatuuridel tekib vee aurustumise tulemusel betooni pinnalt kahanemine, mis võib viia pragude tekkimiseni, eriti kuna külm betoon ei ole kahanemisdeformatsioonidele veel piisavalt vastupidav. [47]

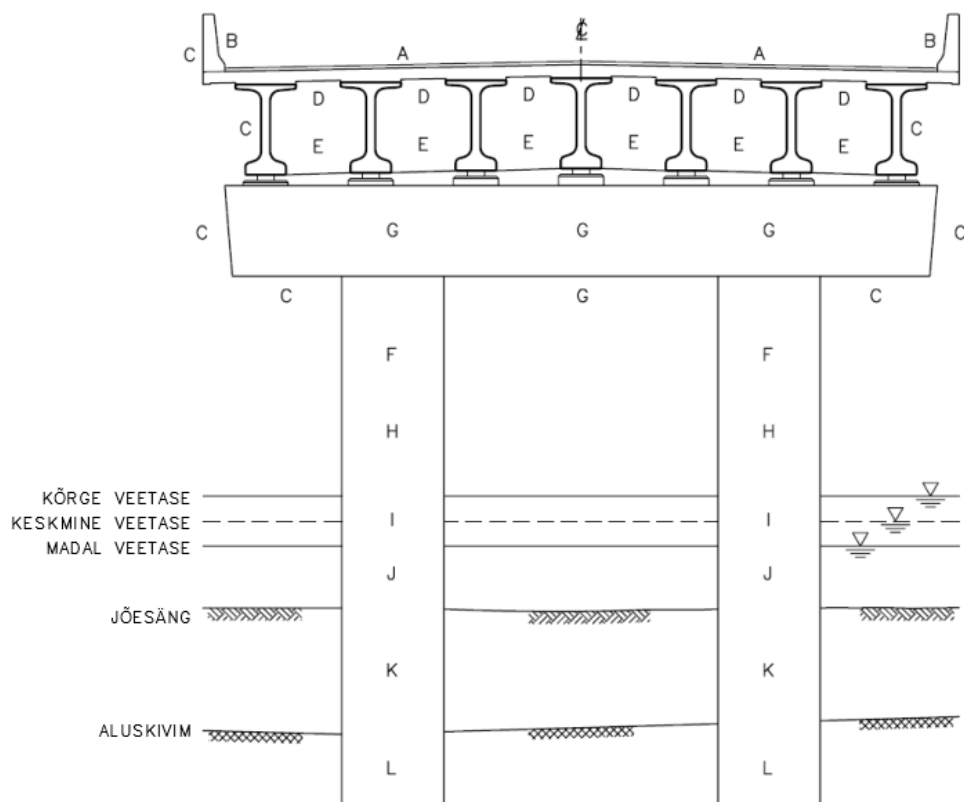
Ideaalseteks betoneerimistingimusteks peetakse temperatuure vahemikus 15–20 °C, suhteliselt kõrget õhuniiskust (soovitavalt mitte alla 70%) ning tuulevaikset päikeseta ilma. [49]

1.4.1 Külmakindel betoon infrastruktuuri rajatistel

Lisaks ilmatikuoludele ja keskkonnale võivad taristuehituse konstruktsioonide külmumise ja sulamise tagajärgi süvendavad erinevad soolad, mida kasutatakse nt talihooldes. Need kiirendavad pragunemist ja riknemist ning vähendavad betoonpinna

kvaliteeti. Seega saab betooni eluiga pikendada, parandades selle võimet taluda külmumis-sulatustsükleid eeldatava eluea jooksul. [45]

Järgnevalt on välja toodud silla ristlõike (vt Joonis 1.2) põhiselt erinevate sillaelementide mõjurid (vt Tabel 1.5). Sellest tulenevalt on ette nähtud elementidele keskkonnaklassid, mida projekteerimisel ja ehitamisel on vajalik järgida. [50]



Joonis 1.2 Sillaelemendid [50]

Tabel 1.5 Sillaelementide mõjurid keskkonnas [50]

Tähistus	Element	Mõjurid	Halvenemine	Soovituslik klassifikatsioon
A	Tekiplaat	Vihm, tuul ja lumi Jäätõrjesoolad Liikluskoormus	Külmarünnak Pinna halvenemine Karboniseerumise ja kloriidide põhjustatud korrosioon	XD3 + XF4
B	Servapruss	Külmutamise ja sulatamise Tsüklid Kokkupuude CO ₂ -ga		XD3 + XF4
C	Servapruss	Päikesevalgus Voolav vesi		XD3 + XF4
D, G	Tekiplaadi alus	Pragunemine Vee lekkimine Külmutamise ja sulatamise Tsüklid Niiske keskkond		XD3 + XF4

Tähistus	Element	Mõjurid	Halvenemine	Soovituslik klassifikatsioon
E	Talad	Vihm, tuul ja lumi Külmutamise ja sulatamise Tsüklid Niiske keskkond		XD3 + XF4
F, H	Sambad	Vihm, tuul ja lumi Külmutamise ja sulatamise Tsüklid Päikesevalgus		XD3 + XF4
I	Sambad	Vihm, tuul ja lumi Külmutamise ja sulatamise tsüklid Voolav vesi (veekogud) Jää ja vee hõõrdumine		XD3 + XF4
J	Sambad	Õhu ja vaba hapniku puudumine Voolav vesi (veekogud) Jää ja vee hõõrdumine		XD3 + XF4
K	Sambad	Õhu ja vaba hapniku Puudumine Voolav vesi (veekogud) Settekiht	Olulist halvenemist ei ole	XD3 + XF4
L	Sambad	Õhu ja vaba hapniku Puudumine Voolav vesi (veekogud) Agressiivne pinnas		XD3 + XF4

1.4.2 Sildade hooldus ja selle mõju külmakindlusele

Betoonkonstruktsioonide vastupidamist külmumisele ja sulamisele saab parandada betoonpindade hooldusega. Sildade hoolduse üks osa on regulaarne inspekteerimine ja jälgimine. Rajatise pideval jälgimisel ja vaatlemisel on võimalik tuvastada kahjustusi ja deformatsioone.

Kontrollida tuleb silla erinevaid elemente ning neid tuleb regulaarselt puhastada ja vajadusel parandada/remontida. Elementide puhastamisel tuleb eemaldada prügi, tolmu ja muud saasteained, mis võivad põhjustada korrosiooni ning kulumist. Külmad talvekuud võivad põhjustada betooni pragunemist ja kahjustusi, eriti kui betoon ei ole külmakahjustuste suhtes piisavalt vastupidav. Praod ja augud tuleb betoonpindadel täita, et vältida niiskuse sissetungi ja sügavamate kahjustuste teket. Niiskus tungib läbi kahjustuse betooni sisse rohkem seetõttu, et kahjustuse kaudu on avatud otsetee

pooridesse ja sisemistesse õõnsustesse. Seega võimaldab auk betooni läbimist ja suurendab niiskuse sissevoolu, kui võrrelda seda ühtlase struktuuriga betooni pinnaga, kus pole otsest teed pooridesse. [51]

Tuleb teostada regulaarseid laboratoorseid analüüse ja teste, et hinnata betooni tugevust, kulumiskindlust ja külmumise-sulamise vastupidavust. Laboratoorne analüüs jälgib betooni kulumiskindluse muutusi ajas, hinnates selle kvaliteeti ja vastupidavust erinevatele keskkonnatingimustele. Pidev jälgimine toob esile võimalikke probleeme või nõrkusi betoonisegus ning võimaldab teha vajalikke kohandusi segu koostises või valmistamisprotsessis, parandades seeläbi üldist vastupidavust. [51]

Hooldusjuhendites on välja toodud, et raudbetoonist sillaelementide eluiga on 100 aastat. Lisaks on kirjas hooldusmeetmed ning remondi põhjused. Tabeli 1.6 põhjal saab järeldada, et kui hooldada betoonist sildasid ettenähtud soovitude järgi, siis saab vältida mõjureid, mis saavad tekitada betoonpindadele olulisi kahjustusi, mõjutades betooni külmakindlust.

Tabel 1.6 Väljavõtte silla hooldusjuhendist [autori erakogu]

Konstruksioon	Tüüp / materjal	Eluiga, aastat	Hooldus	Põhjus vahetuseks / remondiks
Vundament	Raudbetoonist puurvai	100	Hooldevaba	Rajatise kasutamist takistavad deformatsioonid
Sambad	Raudbetoonist post	100	Pesemine korra aastas, kevadel	Pragude avanemine > 0,3 mm Sarruse korrosioon Liiklusõnnetusest põhjustatud kahjustused
Tekiehitus	Raudbetoon plaat	100	Pesemine korra aastas, kevadel	Pragude avanemine > 0,3 mm Sarruse korrosioon Liiklusõnnetusest põhjustatud kahjustused
Pealesõiduplaadid	Raudbetoon plaat	100	Hooldevaba	Rajatise kasutamist takistavad deformatsioonid

Betoonpindade korrapärane pesemine kevadel on oluline, et eemaldada tolmu, mustust, liiva, soola jääke ja muid saasteaineid, mis kogunevad aasta jooksul sillateki pinnale. Soolasid kasutatakse sageli teedel ja sildadel lume ja jää sulatamiseks ning libeduse

vähendamiseks talvistel tingimustel. Kui soolalahused satuvad betooni pooridesse ja pragudesse ning seejärel toimub külmutus-sulatustsükkel, võib soola kristalliseerumine põhjustada betooni pragunemist ja kahjustusi. See võib vähendada betooni tugevust ja vastupidavust ning suurendada külmakahjustuste riski.

1.4.3 Betooni kaitsmine väliselt

Betoonkonstruktsiooni kaitsmise ja isoleerimise eesmärk on hoida seda kuivana ning seeläbi aidata vältida külmakahjustusi. Samas võib kerkida esile probleem, kui hüdroisolatsiooni on tehtud liigselt (hüdroisolatsioonikihtide paksus või nende kasutamine on ülemäärane) ning betoonis sees olev niiskus ei saa välja ja tekivad praod. Niiskuse väljumise ning külmumis-sulamise tõttu tekkinud praod loovad võimaluse betoonis oleva armatuuri kahjustusteks. [51]

Pinnakaitse süsteemid jaotatakse EVS-EN 1504-3 standardi kohaselt järgmistesse kategooriatesse:

- Hüdrofoobimine: kasutatakse betooni mittemärguva pinna töötlemiseks, kus poorid ja kapillaaride sisepinnad kaetakse, kuid ei täideta. Betooni pinnale ei teki kelme. Materjalideks võivad olla silaanid või siloksaanid.
- Immutamine: kasutatakse betooni pinna poorsuse vähendamiseks ja pinna tugevdamiseks (orgaanilised polümeerid). Selle tulemusena moodustub betooni pinnale õhuke kaitsekiht paksusega 10 µm kuni 100 µm. Materjalidena kasutatakse orgaanilisi polümeere.
- Pindamine (pinnakaitse): hõlmab betooni pinnale kantud kaitsekihti, moodustades ühtlase paksusega (0,1 kuni 2,0 mm) kaitsekihi. [1] [52]

Spetsiaalne kaitsekiht loob veekindla barjääri, mis aeglustab betooni sisemiste pooride kahjustumist, mis on põhjustatud külmumise ja sulatamise tsüklitest. Samuti aeglustab kaitsekiht kahjutute pooride muundumist kahjulikeks poorideks. [53] Samas ei ole betooni niiskuse eest kaitsmine mõistlik näiteks juhul, kui tegemist on betooniga, mis paraneb niiskuse abil. [54]

Veekindlad membraanid või katted (hüdroisolatsioon) kaitsevad betoonpindu sademete ja niiskuse eest ning takistavad vee imendumist betooni. Sügavimpregneerivad ained tungivad betooni pooridesse, muutes betooni tihedamaks ja vastupidavamaks niiskusele. [55] Selline kaitsmine võib mõjuda negatiivselt betooni külmakindlusele. Kui betooni külmakindluse tagamiseks vajalikud poorid on täidetud impregneerivate

ainetega, siis ei saa need poorid võimaldada vee paisumist ja kokkutõmbumist betoonis ning tekib pragunemine.

Immutamise vahendid võivad mõjutada betooni külmakindlust nii positiivselt kui ka negatiivselt, olenevalt nende koostisest ja kasutamiseviisist. Kui immutamise vahendid vähendavad betooni veeauruläbilaskvust liigselt, võib see piirata niiskuse liikumist betoonis, mis omakorda suurendab niiskuse kogunemise riski betooni sees, eriti külmumise ja sulamise tsüklite ajal. Lisaks võivad mõned immutamise vahendid sisaldada kemikaale, mis võivad reageerida betooni komponentidega, seda nõrgendades või pragunemist tekitades. Need reaktsioonid võivad samuti soodustada niiskuse kogunemist betoonis, suurendades seeläbi kahjustuste riski. Keemilised mõjud võivad vähendada betooni külmakindlust, mõjutades pooride suurust ja jaotust või suurendades betooni niiskusesisaldust. [56]

Kui betooni kaitstakse väljastpoolt erinevate vahenditega, võib niiskuse väljumine olla piiratud või aeglustatud. Niiskus võib betoonist väljuda aurustumise, dreanaažisüsteemi või hügrokoopsete ehk vett imavate materjalide abil, mis neelavad niiskust ja aitavad seda välja juhtida. On oluline valida kaitsesüsteem, mis võimaldab piisavalt niiskuse väljumist, et vältida betooni sees kogunemist ja võimalikku kahjustust. Lisaks on oluline kasutada ehitusetapis kvaliteetseid ehitusmaterjale, et tagada sildade vastupidavus ja kaitse kahjustuste eest.

Uurimistöös [57] leiti, et hüdrofoobsed lisandid suurendavad betooni veepidavust ja aitavad sulgeda kuni 0,4 mm laiuseid pragusid. Lisandid mõjutavad betooni plastsust, õhusisaldust ja survetugevust. Lisaks uuriti betooni võimet ise paraneda nii lisandiga kui ka ilma. Tulemused näitavad, et hüdrofoobsed lisandid muudavad betooni veekindlamaks, kuid samas on oluline arvestada, et betoonis peab säilima teatav poorsus, et tagada külmakindlus. Seega tuleb leida tasakaal veepidavuse ja külmakindluse vahel.

Betooni pinna kaitsmine erinevate materjalidega on vajalik isegi juhul, kui betoon iseenesest ei ole väga vettimav. Kuigi betoon võib olla vastupidav ja vähem poorne, eriti kui see on valmistatud kõrge tugevusega ja õige vee-tsemendi suhtega, ei ole see siiski täielikult veekindel. Betooni poorne struktuur võimaldab endiselt veeauru läbimist, mis võib pikaajaliselt põhjustada kahjustusi ja vajadust hooldustööde järele. [58]

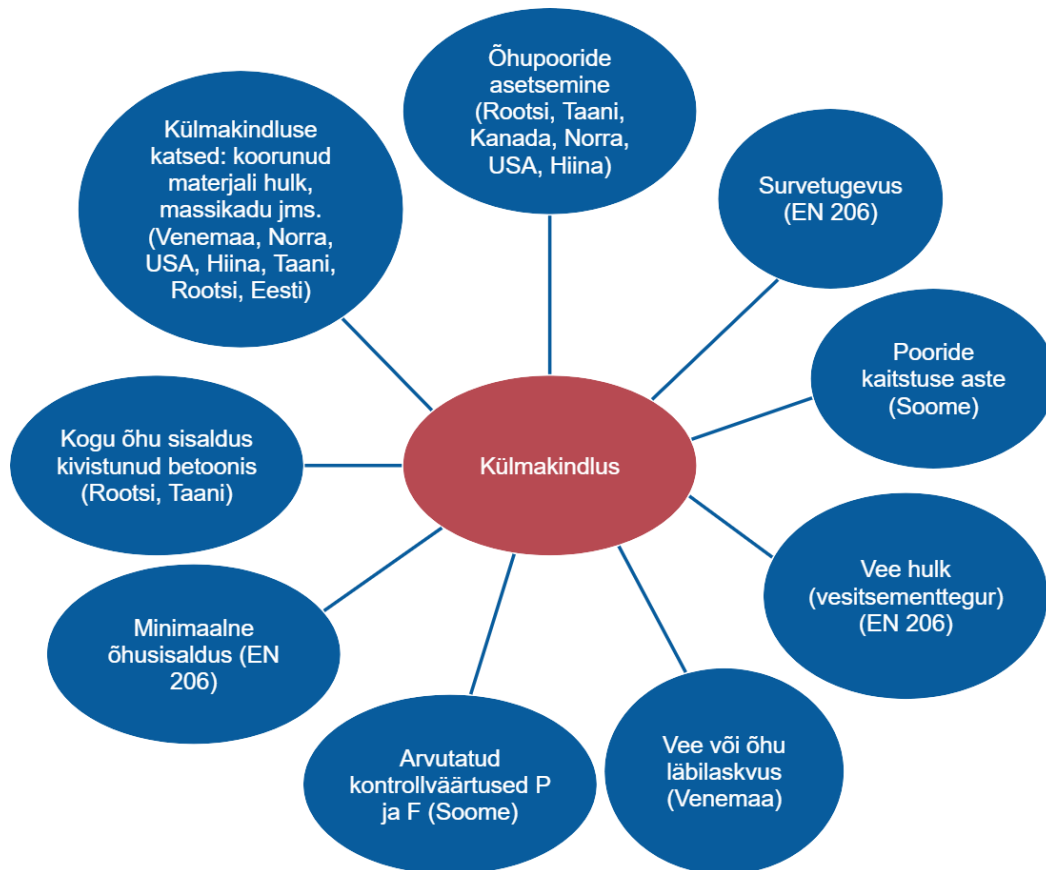
Kuigi betoon on tugev ja vastupidav ehitusmaterjal, võivad betoonpindu mõjutada mitmed keskkonna- ja kasutustingimused, mis muudavad nende kaitseks täiendavate

vahendite kasutamise mõistlikuks. Näiteks on kaitsevahendite kasutamine, lisaks külmakindluse tagamiseks, vajalik niiskuse ja veekahjustuste ennetamise, keemiliste kahjustuste ja libeduse vähendamise ning UV-kiirguse kaitse jaoks.

1.5 Külmakindluse katsetamise meetodid

Külmakindluse määramiseks kasutatakse keerukaid katsemeetodeid (nt koorunud materjali ja sisemise pragunemise hindamine külmutustsüklite ajal). CEN/TR 15868 soovitab, et iga riik määratleks endale vastavad keskkonnaklassid ja sobivad piirväärtused. Mitmed Euroopa riigid on ühendanud külmakindluse omadused karboniseerumise ja kloriidide sisaldusest tulenevate keskkonnaklassidega, kuigi standardid seda ei toeta. See lihtsustab klassifikatsioonisüsteemi kohalikele oludele vastavaks, kuna üks keskkonnaklass ei mõjuta iseseisvalt teisi, ja erinevatele keskkonnaklassidele vastav betoon säilitab samad omadused. [8]

Erinevad riigid mõistavad külmakindluse vastupanu betooni erinevalt ja seetõttu esitavad erinevaid nõudeid. [8] Joonisel 1.3 on toodud erinevate riikide külmakindluse nõuded, näidates nende märkimisväärselt varieeruvust.



Joonis 1.3 Erinevate riikide külmakindluse nõuded [8]

Betooni külmakindluse hindamiseks kasutatakse ehitusobjektidel rõhumõõturi abil betooni õhusisalduse määramist enne selle paigaldamist. Näiteks, kui betooni õhusisaldus on 2%, võib eeldada, et betoon ei pruugi olla külmakindel, kuna selles võib õhku liiga vähe või üldse mitte olla. Rõhumõõturi meetod ei anna täpset kirjeldust betooni õhustruktuuri kohta ega erista manustatud õhku ümbritsevast õhust, kuid see on siiski levinud meetod külmakindluse prognoosimiseks Eestis. [26]

1.5.1 Traditsioonilised meetodid

Külmakindluskatsed on välja töötatud, et mõista, kuidas materjali omadused mõjutavad külmakindlust ja võrrelda erinevaid betoonisegusid. Katsed jagunevad kaheks: esimeses hinnatakse koorunud materjali hulka ja teises sisemist pragunemist. [8]

Koorunud materjali hulk

EVS 814 standardi kohaselt määratakse betooni külmakindlust kindla arvu külmumis-sulamistsüklite läbimisel toimunud massikaoga ehk jälgitakse katsekehadelt koorunud materjali hulka kg/m^2 suurusena. [2] Külmutamise ja sulatamise katsed viiakse läbi, et

hinnata kivistunud betooni proovi vastupidavust lagunemisele, kui see puutub kokku korduvate külmumis- ja sulamistsüklitega. [59]

Katse kestab kokku 56 päeva ning selle aja jooksul läbib betooni katsekeha 24-tunniseid külmumis-sulamistsükleid kliimakabris vee- või naatriumkloriidi lahuses. Käesolevas uurimistöös kasutati 3% naatriumkloriidi lahust. Pinna koorumine – kajastab ainult väliseid kahjustusi, kuid mitte sisemisi. Võib kooruda vähe, kuid annab alguse kahjustusteks, mis avalduvad hiljem. [39] Lisaks on välja toodud, et see katsemeetod ei arvesta reaalse olustike ja mõjuritega, mis võivad betooni mõjutada. Katse lubatud piirväärtused on välja toodud tabelis 1.7.

Tabel 1.7 Betooni külmakindluse normväärtused [2]

Keskkonna klass	Külma-kindluse klass	Külmakindluse vastavuskriteeriumid, kui külmutuskeskkonnaks (külmutusaineks) on	
		vesi	3% NaCl vesilahus
XF1	KK1	$S_{56} \leq 0,50$ - koorunud (murenenud) materjali mass pärast 56 tsüklit on väiksem kui $0,50 \text{ kg/m}^2$ või $S_{56} \leq 1,00$ - koorunud (murenenud) materjali mass pärast 56 tsüklit on väiksem kui $1,00 \text{ kg/m}^2$, kui S_{56}/S_{28} on väiksem kui 2.	-
XF2	KK2	-	$S_{56} \leq 0,50$ - koorunud (murenenud) materjali mass pärast 56 tsüklit on väiksem kui $0,50 \text{ kg/m}^2$ või $S_{56} \leq 1,00$ - koorunud(murenenud) materjali mass pärast 56 tsüklit on väiksem kui $1,00 \text{ kg/m}^2$, kui S_{56}/S_{28} on väiksem kui 2.
XF3	KK3	$S_{56} \leq 0,20$ - koorunud (murenenud) materjali mass pärast 56 tsüklit on väiksem kui $0,20 \text{ kg/m}^2$ või $S_{56} \leq 0,50$ - koorunud (murenenud) materjali mass pärast 56 tsüklit on väiksem kui $0,50 \text{ kg/m}^2$, kui S_{56}/S_{28} on väiksem kui 2	-

Keskkonna klass	Külma-kindluse klass	Külmakindluse vastavuskriteeriumid, kui külmutuskeskkonnaks (külmutusaineks) on	
		vesi	3% NaCl vesilahus
XF4	KK4	-	<p>$S_{56} \leq 0,20$ -koorunud (murenenud) materjali mass pärast 56 tsükli on väiksem kui $0,20 \text{ kg/m}^2$ või</p> <p>$S_{56} \leq 0,50$ -koorunud (murenenud) materjali mass pärast 56 tsükli on väiksem kui $0,50 \text{ kg/m}^2$, kui S_{56}/S_{28} on väiksem kui 2</p>

Kui betoon ei vasta külmakindluse nõuetele, siis vähendatakse tasu, mis ehitaja saab tehtud töö eest. Alles siis, kui massikadu on suurem kui 20% projektsest külmakindluse klassile lubatud massikaost, tuleb konstruktsioon või selle osa ümber teha. [3] Summat, mille võrra tasu vähendatakse, arvutatakse valemiga 1.2.

$$A = 16 * \left(1 - \frac{p'}{p}\right)^2 * H * V \quad (1.2)$$

kus

A on maksumuse vahendamine, €;

p' on betoonpinna tegelik pinnakooremise massikadu;

p on betoonpinna lubatud pinnakooremise massikadu;

H on konstruktsiooni hind. €/m³;

V on konstruktsiooni või detaili maht, m³.

Sisemine pragunemine

Külmakindluse hindamisel on sisemisel pragunemisel sama oluline roll kui koorunud materjali hulga määramisel, kuigi selle testimine pole nii levinud. Tehniline juhend CEN/TR 15177 esitleb kolme erinevat meetodikat, mis võimaldavad sisemist kahjustust hinnata. Kuigi selget juhust nõuete määramiseks pole, on erinevaid nõudeid katsekehade ja mõõteseadmete jaoks. Need meetodikad põhinevad kõik elastsusmooduli muutuste jälgimisele ja hõlmavad talakatset, plaadikatset ning CIF-katset, mis on hetkel veel tehnilise soovitusel tasandil. [8]

Löökresonantsmeetod võimaldab mõõta betooni külmakindlust ilma katsekeha füüsiliselt purustamata. Meetod keskendub betooni sisestruktuuri muutustele, rakendades katsekehadele 24-tunniseid külmatsükleid. Katsekeha läbib korduvaid külmutamis- ja sulatamistsükleid ning sellele antakse lööke eri suundadest. Andurid

mõõdavad katsekeha omavõnkesagedusi, mille alusel arvuti määrab elastsusmooduli ja Poissoni teguri. Võrreldes neid tegureid, saab hinnata katsekeha sisestruktuuri kahjustust. See meetod on eelistatud, kuna see ei nõua betooni füüsilist purustamist muutuste mõõtmiseks. [26]

Enne Eesti taasiseseisvumist kasutati külmakindluse määramiseks Nõukogude Liidu standardit GOST. Katsetes mõõdeti survetugevust vastavalt standardile GOST 10060.4-95. [60] Proovikehad valmistati mõõtmetega 100x100x100 mm, kivistati 28 päeva ning seejärel küllastati veega. Pärast küllastumist läbisid katsekehad külmutamissulatamistsükleid vastavalt standardile, mis võimaldas päevas mitu tsüklit teha. Kui survetugevuse langus oli <5%, loeti betoon külmakindlaks. See meetod hindab betooni sisestruktuuri muutusi survetugevuse muutuse kaudu. [60]

1.5.2 Traditsiooniliste meetodite puudused ja väljakutsed

Lõputöö autori arvates ning erinevate asjassepuutuvate isikutega suhtlemisel saab traditsiooniliste meetodite puuduseks tuua järgnevat. Praegused katsed võtavad aega 28+56 päeva, mis on liiga pikk aeg, et teha õigeid muudatusi konstruktsioonis. Sisemise pragunemise uurimine ei pruugi alati anda täielikku ülevaadet betooni sisemistest pragudest, eriti kui need on mikroskoopilised või sügavamal tasemel. Samamoodi võib koorunud materjali hulga mõõtmine olla ebatäpne, kuna koorunud materjali võib olla erinevates sügavustes ja seda võib olla raske täpselt mõõta.

Tallinna Tehnikakõrgkooli õppeprorektori Martti Kiisa arvates on praegu kasutusel olev betooni külmakindluse hindamise meetod, mis baseerub koorunud materjali hulgal, nagu kirjeldatud katsestandardis EVS 814, põhimõtteliselt sobiv, kuid mõningaid nüansse saab esile tuua:

- Katsemetoodikat võiks täiendada katsekehade pildistamisega pärast puhastamist. Lõputöö autor toob siinkohal välja, et see nõue on standardis EVS 814 välja toodud, kuid tihtipeale seda ei täideta.
- Üleminekuteguri(d) võiks kasutusele võtta, võimaldamaks erinevatel tingimustel ja aegadel võetud proovikehade tulemuste adekvaatset võrdlust (nt betoonisegust valmistatud ja hiljem betoonist väljapuuritud katsekehad).
- Metoodikat saaks täiendada ultrahelikiiruse mõõtmisega.
- Tuleb pöörata tähelepanu standardis kirjeldatud katsemetoodika eripäradele, mis on välja töötatud kiiresti kivineva sideaine CEM I sisaldusega betooni jaoks, millest tulenevalt võivad aeglasema kivinemisprotsessiga külmakindlad betoonid

saada negatiivseid tulemusi. Seega võiks tulevikus kaaluda katsekehade hoiustamisperioodi muutmist vastavalt tsemendi klassile, et tagada võrdsed tingimused erinevate betoonisegude jaoks.

- Vanusekontrolli tuleks rangemalt jälgida, et tagada võrreldavad tingimused, eriti seoses katsekehade vanusega, mis ületab paljudel juhtudel standardmeetodis kirjeldatud kriteeriumi. See ei ole seotud erinevate tsementide kasutamisega. [8]

1.5.3 Uuenduslikud meetodid betooni struktuuri hindamiseks

Betooni külmakindlust on võimalik mõõta õhusisalduse abil, mis väljendab õhu sisaldust betoonis. [35] Eelnevates peatükkides on välja toodud tegurid, mis mõjutavad betooni külmakindlust ning need on otseses seoses betoonis oleva õhuga.

Õhusisaldus mõjutab otseselt betooni külmakindlust, kuna õhk betoonis võib vähendada selle jäikust ja vastupidavust külma ilmaga. Õhusisaldus on seotud ka õhumullide eripinna (*air specific surface*) ja paigutusteguriga (*spacing factor*). [35]

Suurem õhu eripind näitab, et betoonis on palju väikeseid õhumulle, mis on ühtlaselt jaotunud. See jaotus parandab betooni võimet taluda külmumis- ja sulamistsükleid, kuna väikesed õhumullid toimivad nagu miniatuursed paisumisruumid, leevendades jääkristallide tekitatud survet. Paigutustegur on mõõde, mis näitab, kui ühtlaselt õhk betoonis jaotub. Kõrge paigutustegur näitab, et õhk on betoonis ühtlaselt jaotunud, mis võib suurendada betooni külmakindlust. Madal paigutustegur võib tähendada, et õhk on kontsentreeritud teatud piirkondadesse või pooridesse, mis võib mõjutada negatiivselt betooni külmakindlust. Seega on õhusisaldus, õhu eripind ja paigutustegur olulised tegurid, mida arvestatakse betooni külmakindluse määramisel, ning need on omavahel seotud. [41]

1.5.4 ASTM C457/C457M-16 standardi meetodi selgitus

Õhusisaldust mõõdetakse tavapäraselt rõhumeetodil vastavalt standardile EN 12350-7. [4] Rõhumõõtur hindab üldist õhusisaldust, võtmata arvesse tühimike suurust ja selle jaotust. Euroopas on kasutusel ka katsemetoodikad õhu struktuuri hindamiseks, näiteks

kasutatakse standardmeetodeid nagu ASTM C457/C457M-16 ja EVS-EN 480-11. Need meetodid kirjeldavad betooni õhutühimike mõõtmist mikroskoobi abil. [5] [61]

Näiteks ASTM C457/C457M-16 järgi uuritakse mikroskoobi abil katsekehasid, mis võivad olla pärit nii laborist kui ka ehitusobjektidelt. Katsetatav pind peab olema ette valmistatud lihvimise teel ning pind peab olema sile ja tasane, et tagada õigete tulemuste saamine. Õhutühimike mõõtmisel peavad õhutühimike servad olema teravad ja selgelt eristuvad tsementkivist ning täitematerjali pinnast. Kehtivate standardite kohaselt peavad õhutühimikud olema vähemalt 10 µm suurused. [5] [61]

Standardi ASTM C457/C457M-16 kohaselt tehakse mikroskoopilist uurimist betooni katsekehade kohta, mis võivad olla pärit laborist või ehitusobjektidelt ning ka konstruktsioonist lõigatud. Katsekeha analüüsitava pinna suurus sõltub kasutatud täitematerjali maksimaalsest suurusest, suuremaks minnes kasvab ka katsetatav pind. Enne analüüsi tuleb proovikehad korralikult ette valmistada, lihvides, puhastades ja vajadusel kontrasti lisades. Pinna ebatasasuste korral alustatakse lihvimist jämedama liivapaberiga ning jätkatakse peenematega. Pärast seda hinnatakse pinna taset ja kontrollitakse, et defektid ei moonutaks õhutühimike analüüsi. [5] [61]

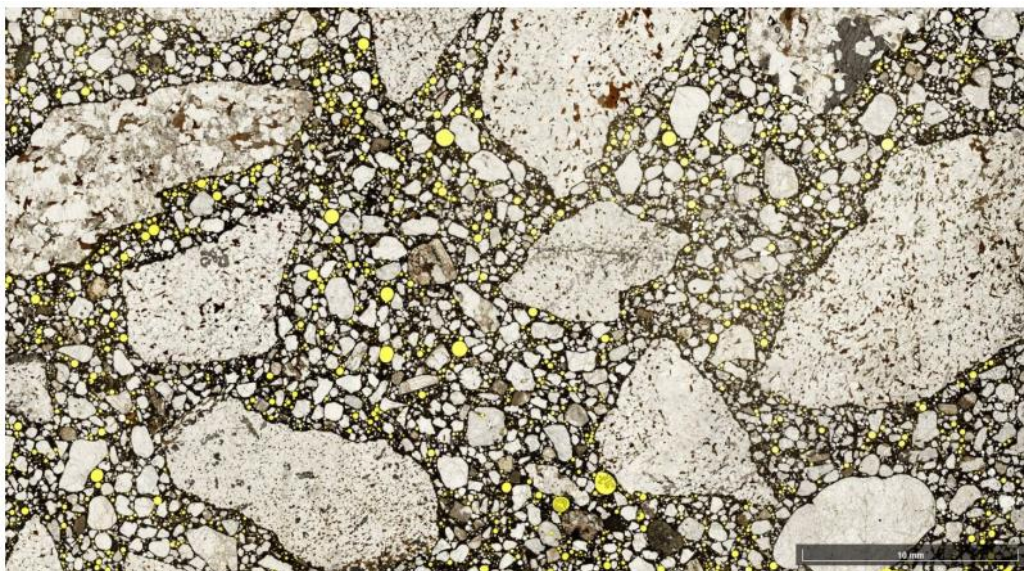
Analüüsi käigus hinnatakse õhumullide ja tsementkivi osakaalu ning õhutühimike suurust ja jaotust. Standardis on kirjeldatud kolme peamist meetodit: lineaarset läbimist, modifitseeritud punktilugemist ning kontrasti suurendamist. Iga meetod võimaldab õhusisalduse, paigutusteguri ja õhumullide eripinna mõõtmist. Need meetodid võimaldavad hinnata juba kivistunud betooni õhusisaldust, kuid värske betoonisegu õhusisalduse määramiseks on vaja spetsiifilisemat meetodit. Standardite ASTM C457 ja EVS-EN 480-11 järgi on välja töötanud meetod õhusisalduse analüüsimiseks värskes betoonisegus. [5] [61]

1. *Linear traverse* meetod: Kasutatakse saetud ja lihvitud betooniproovide ristlõigete uurimist, kusjuures andmed kogutakse regulaarselt paigutatud joont mööda komponente läbides. [5]
2. Muudetud punktloendamise meetod: See meetod põhineb betooni komponentide sagedusel, mis langevad kokku regulaarse ruudustikuga punktides, kus tehakse peatused koostise määramiseks. [5]
3. Kontrasti suurendamise meetod: See protseduur hõlmab digitaalsete piltide analüüsi ettevalmistatud betoonipinna kohta, kasutades regulaarselt paigutatud jooni ühes või mitmes digitaalses pildis, mis on saadud ühest või mitmest ristlõikest. [5]

Standard rõhutab, et täpse tulemuse saamiseks on oluline jälgida etteantud protseduure, sealhulgas proovi ettevalmistust ja mikroskoopilist analüüsi. Samuti on oluline märkida, et C457 standardi kasutamine eeldab, et kasutaja mõistab betooni mikrostruktuuri ja oskab eristada õhutühimikke muudest mikrostruktuuri elementidest.

Mikroskoobi abil õhumullide uurimise protsess vastavalt ASTM C457 standardile hõlmab proovide ettevalmistamist (saagimine ja lihvimine), mikroskoopilist vaatlust kasutades ühte kolmest kirjeldatud meetodist ja saadud andmete analüüsi. See protsess võimaldab hinnata betooni mikrostruktuuri ja õhupoorisüsteemi omadusi, mis on olulised betooni külmakindluse ja vastupidavuse seisukohalt. [5]

Uurimistöös raames viidi mikroskoobi abil õhusisalduse katsed läbi Soomes Sweco Finland Oy ettevõttes katsemetoodika by72 kohaselt. See katse on sarnane ASTM C457 standardis kirjeldatud muudetud punktiloendamise meetodiga. Meetodi kohaselt identifitseeritakse iga punkt modifitseeritud pildi abil (vt Joonis 1.4), mida võivad esindada täitematerjal, tsemendipasta või poor ning loendatakse nende punktide poolt lõikuvate pooride arv. Poorid jaotatakse kaheks suuruskategooriaks: kaitsepoorid ja tihenduspoorid. Arvesse võetakse ainult kaitsepoorid, mis on ümarad või peaaegu ümarad. See võimaldab tuvastada betooni koostisosad, nagu kiviaines, tsemmentpasta ja õhupoorid. [5] [62]



Joonis 1.4 by72 meetodi uuringu tulemus [autori erakogu]

1.5.5 AVA meetodi selgitus

Õhu sisalduse mõõtmiseks kasutatav rõhumeetod annab infot meile kogu õhu sisalduse kohta värskes betoonis, kuid ei anna infot õhumullide eripinna ning vahekauguste kohta. ASTM C457/C457M-16 meetodi järgi saab õhumullide kohta infot kõvastunud betoonist. Kuna kõvastunud betooniproov võetakse tavaliselt 3 päeva pärast paigaldamist ja tulemused saadakse kahe nädala jooksul, siis on juba liiga hilja, et betoonisegu muuta.

Proove saab võtta värskest valatud või veel valamata betoonist, tagades kiirema tulemuse kui kivinenud betooni uurimisel. [8] Selleks kasutatakse spetsiaalset katseseadet koos vastava meetodikaga, mis võtab aega kuni 25 minutit. Lisamärkusena saab juurde tuua, et betoonisegu peab katse alguseks olema seisnud vähemalt 60 minutit, et lisandid jõuaksid korrektselt toimima hakata. Lühikest katsetamise aega peetakse piisavaks, et teha mõõtmisi ehitusobjektidel ning vajadusel korrigeerida betoonisegu õhusisaldust ja -struktuuri. [26] [41] [45]

Kuigi AVA meetod on standardiseerimata, on see võrreldav Euroopa standardiga EVS-EN 480-11. Tulemused erinevad ASTM C457/C457M-16 standardis väljatoodud lineaarse läbimise meetodiga võrreldes umbes $\pm 10\%$, mis on piisav täpsus betooni pooride struktuuri hindamiseks ja külmakindluse määramiseks enne paigaldamist. Kuigi AVA meetodit kasutatakse Eestis vähe, peamiselt standardiseerimata meetodi ja kõrge seadme- ning katsekulu tõttu, on see siiski tõhus vahend betooni õhusisalduse hindamiseks ja struktuuri analüüsimiseks. [26] [41] [45] Enne AVA kasutuselevõttu võis seda spetsiifilist teavet saada ainult laboritingimustes tahkestatud betooni proovide kaudu.

Värske betoonisegu õhusisalduse, õhumullide eripinna ning paigutusteguri määramiseks on Germann Instrumentsi välja töötatud *Air Void Analyzer* (AVA). Tootja juhendis on välja toodud, et kvaliteetse ja külmakindla betooni eripinda on üle 25 mm^{-1} (ehk iga õhutühimiku kuupmillimeetri kohta on 25 millimeetrit pinda) ja paigutustegur alla 0,20 mm (ehk mis tahes punktist tsemendipastas kuni lähima õhutühimiku piirini on maksimaalne kaugus 0,2 millimeetrit). [41]

Uurimistöödest, mis käsitlevad betooni õhutühimike süsteemi ja selle mõju külmakindlusele, on leitud, et õhutühimike eripinna väärtus on oluline näitaja. Ühes uurimuses [20] rõhutati, et betooni vastupanuvõime külmumisele ja sulamisele nõuab korralikku õhutühimike süsteemi, kus eripind peaks olema suurem kui $24 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$. See tähendab, et väiksemate ja tihedamalt paiknevate õhutühimike olemasolu parandab betooni külmakindlust, vähendades hüdraulilist survet, mis tekib vee külmumisel.

Teises uurimuses [63], mis kasutas X-kiirte mikrotomograafiat betooni õhutühimike analüüsimiseks, täheldati, et lisamaterjalidega – asendades osaliselt tsementi – paranes betooni külmakindlus. Uuringus märgiti, et kui tsemendi asendusmäära suurendati, paranesid õhutühimike parameetrid, sealhulgas eripind ületas $24 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$. See tähendab, et betoonis oli rohkem väikeseid õhutühimikke, mis on olulised betooni külmakindluse tagamisel.

Need uurimused kinnitavad, et õhutühimike eripinna piiri 25 mm^{-1} (või ligikaudu sama suurusjärku, $24 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$, mis on teistes allikates mainitud) peetakse oluliseks näitajaks betooni külmakindluse tagamisel. See piirväärtus aitab tagada, et betoonis on piisavalt väikeseid ja tihedalt paiknevaid õhutühimikke, mis on võimelised leevendama külmumisest ja sulamisest tingitud hüdraulilist survet.

Alates 1999. aastast on USA-s kasutatud AVA tehnoloogiat üheksas osariigis. Erinevad projektid, kus AVA-t kasutati, hõlmasid kõnniteid, vaiu, vundamendielemente ja sillatekke. Ligikaudu pooltel testitud betooniproovidest (kasutades nii AVA kui ka karastatud õhusisalduse teste) olid pooride vahekaugused ebasobivad betooni jaoks seatud normide kohaselt, kuigi õhusisalduse spetsifikatsioonid (tavapärase testide abil) olid täidetud. Tulemused põhinesid nende üheksa projekti raames kogutud 36 betooniproovil. Need tulemused rõhutavad AVA rakendamise tähtsust, et vältida märkimisväärsete koguste ebapiisava külmakindlusega betooni paigaldamist. [45]

Kansase teekatted, mis olid vähem kui kümme aastat vanad, näitasid pragusid ja vuukide kahjustusi, hoolimata sellest, et täitematerjal oli terve ja üldine õhusisaldus vastas spetsifikatsioonidele keskmiselt 5,5%. Proovide analüüsimisel selgus, et betooni pastas olid ebapiisavad vahetegurid. Kuigi raskuste ennetamiseks eelistati ehituse ajal vahetegurite tagamist, osutusid analüüsid liiga aeganõudvaks. Aastatel 2001 ja 2002 kasutati betoonsillutiste projektide jälgimiseks AVA meetodikat. Töövõtjatele viivitamatute tulemuste pakkumine võimaldas neil kiiresti täiustada käimasolevate projektide betoone. Kulude kokkuhoiu hindamiseks kasutati eeldatavat vastupidavuse paranemist, mis põhines täiustatud pooride vaheteguritel. Prognoositav kulude kokkuhoid 2001.–2002. aasta projektide puhul, mis tuleneb vastupidavamate kõnniteede remondikulude vähenemisest, ulatus 1 136 000 dollarini. [64]

Federal Highway Administration sillaehituse uurimise meeskonnajuht Benjamin A. Graybeal on öelnud, et AVA ei ole leidnud nii suurt kasutust Ameerika Ühendriikides, kuna värske betooni kiireks testimiseks peavad olema AVA seadmed valmis välitöödeks,

et neid saaks ehitusplatsil kasutada. Paraku ei ole sellise süsteemi korraldamine veel õnnestunud. Lõputöö autor ei näe sellist probleemi Eesti tingimustes, kuna betoonitööstuste ja objektide vahemaad on üpriski väikesed ning piisava etteteatamisajaga saab AVA katsemeeskond tulla objektile kohale õigeks ajaks. Probleem seisneb pigem selles, et Eestis ei ole praegu palju AVA seadmeid.

2 KATSELINE OSA

2.1 Metoodika

Töö eesmärk oli uurida AVA edasist võimalikku kasutamist betooni külmakindluse testimisel ning hinnata AVA meetodi tõhusust ja usaldusväärsust võrreldes traditsioonilise külmakindluse katsega. Uurimistöö käigus katsetati alternatiivset meetodit betooni külmakindluse hindamiseks. Selleks valmistati kokku 12 erineva seguga betoonisegust 24 katsekeha (igast retseptist kaks) standardi EVS 814 järgi katsetamiseks. Lisaks valmistati kaks katsekeha standardi ASTM C457/C457M-16 järgi katsetamiseks ja lisaandmete saamiseks. Lisaks viidi üks katse läbi otse objektil.

Iga katsekeha valmistamisel tehti katsed AVA masinaga selleks, et meetodeid ja tulemusi hiljem võrrelda. Katsekehade valmistamine toimus Remei Baltic OÜ laboris ning need lõigati ja valmistati ette TalTechi ülikooli laboris. Remei Baltic OÜ laboris tehti betoonisegude konsistentside ja õhu sisalduse määramised, katsekehade tugevuskatsed ning määrati külmakindlus AVA masinaga. Külmakindluse katsed koorumise meetodil viidi läbi Teede Tehnokeskuse laboris.

2.1.1 Katseplaan ja eesmärk

Katseplaan ja mõõdetud tulemused on välja toodud tabelis 2.1. Katsete eesmärk oli võrrelda pinnakoorumise katsete ning AVA katsete tulemusi. Eesmärgi täitmiseks tehti uurimustöö raames katsekehad, kus muudeti v/ts suhet ning õhu sisaldust lisandite ning täitematerjalide abil. Katsete tulemusena sooviti näha, kas suurem õhu eripind kompenseerib suuremat v/ts suhet või väiksemat tsemendi kogust ning vastupidi. Ehk, kui AVA masin näitab õhumullide eripinnaks vähemalt 25 mm⁻¹, siis kas alati on külmakindlus tagatud.

Retsepti nr	R630	R632	R633	R636	R652	R653	R620	R643	R655	R645	R646	R644
Tsemendi kogus kg/m ³	350	375	375	375	400	400	400	400	425	425	425	425
V/ts	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
Eeldav õhk, %	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Tegelik õhk, %	5,1	5,3	5,3	4,9	4,7	5,0	5,4	4,5	4,5	4,3	5,0	4,5
AVA eripind planeeritud, mm ⁻¹	25,0	25,0	25,0	20,0	25,0	20,0	25,0	20,0	25,0	20,0	25,0	20,0
AVA eripind tegelik, mm ⁻¹	28,3	25,4	24,4	22,1	30,3	18,8	26,4	23,5	33,3	17,2	23,9	24,9

Tabel 2.1 Katseplaani ja mõõdetud tulemused

Iga retseptiga suurendati tsemendi kogust. V/ts oli vastavalt 0,5, 0,45 ja 0,4. Seega, kui tsemendi kogus jätta samaks ning suurendada v/ts suhet, tuleb suurendada vee kogust. Katsetati XF4 betooni klassi.

Plaani ja tulemuste võrdlusest on näha, et mõned tulemused olid oodatust erinevad. Eeldatava ja tegeliku õhusisalduse vahe tuleneb täitematerjalide ja õhku manustava lisandi kvaliteetsusest. Prooviti tekitada struktureeritud poore lisandite ja täitematerjalidega ehk suurendada õhu eripinda. Kui on vähem jämetäitematerjali, siis suureneb peenemate pooride hulk. Katsekehade valmistamisel jõuti järeldusele, et kui muuta liiva sorti, saab mõjutada õhu sisaldust halvema tulemuse poole. Kui kasutada liiva, kus on vähem peenosu (alla 0,25 mm), siis on õhukvaliteet kehvem. AVA masinaga saadud eripinna tulemuste erinevused sõltuvad samadest teguritest.

Teoriaosas on välja toodud, et kui v/ts on madal, siis see on hea, kuna selles on tsemendi osakesed omavahel tihedamalt seotud. See võib parandada betooni tugevust ja vastupidavust. Siiski võib madala v/ts suhtega betoon olla raskemini töödeldav, mis

nõuab plastifikaatorite lisamist, et parandada selle töödeldavust ja konsistentsi. [5] Mida madalam on v/ts, seda vähem on vaba vett, mis võib külmuda ja põhjustada betooni kahjustusi.

2.1.2 Materjalide ettevalmistamine

Betoonisegu koostist arvutati Exceli programmiga, võttes aluseks lähtematerjalide omadused. Betooni koostisosad – täitematerjalid ja tsement (vt Joonis 2.1) – kaaluti täpsusega 5 g, vesi täpsusega 0,1 g ja lisandid täpsusega 0,01 g.



Joonis 2.1 Täitematerjalid ja tsement [autori erakogu]

Betoonisegu valmistamisel segati algselt täitematerjali 20 sekundit. Liivale ja killustikule lisati natuke vett, et täitematerjal märg oleks. Peale tsemendi lisamist segati taas 20 sekundit. Seejärel lisati ülejäänud vesi ning segati taas 20 sekundit. Viimasena lisati lisandid. Peale superplastifikaatori lisamist segati segu 10 sekundit ning õhku manustava lisandi järgselt segati 60 sekundit (vt Joonis 2.2).



Joonis 2.2 Betooni koostisosade segamine [autori erakogu]

2.1.3 Materjalide valik ja nende proportsioonid

Tsement

Katsekehade valmistamisel kasutati Heidelberg Materials Kunda AS-i toodetud CEM I 42,5R tsementi.

Täitematerjalid

Täitematerjalidest kasutati peenliiva 0-2 Männiku, jämeliiva Kuusalu 0-2 ning jämeliiva 0-4 Kuusalu, graniiti 2-5 Kuusalu ja graniiti 4-16 Kuusalu.

Vesi

Betooni katsekehade valmistamisel kasutati joogivett.

Lisandid

Kasutati Remei Baltica OÜ toodetud Carboxyment 3400LL (FM) superplastifikaatorit. Superplastifikaatori puhul peaks doseeringu kogus olema soovituslikult 1–3 kg 1 m³ betoonisegu kohta ehk 0,3–0,8% tsemendi kaalust. Soovitatav vahemik võiks siiski varieeruda 0,5–2% vahel. [19] Lõputöö raames tehtud betoonisegudes doseeriti superplastifikaatorit 0–1,0% tsemendi kaalust.

Õhku manustava lisandina kasutati Remei Baltica OÜ toodetud REBALit LP-50(LP) ja REBALit LP100 (LP) (1:40) lisandeid. Soovituslik lisandi doseering on 0,2–0,6% tsemendi

kaalust. [19] Lõputöö raames tehtud betoonisegudes doseeriti õhku manustavat lisandit 0–1,5% tsemendi kaalust.

2.1.4 Konsistentsi määramine

Standardi EVS-EN-12350-7:2009 [65] järgi tehti Abramsi koonuse vajumi katsed. Koonuse katsevahendi täitmine toimus kolmes kihis. Iga kihti tihendati metallvardaga 25 korda. Katsevahendi pealmine pind tasandati. Alusplaadile sattunud betoon eemaldati. Seejärel tõsteti katsevahend sirgjooneliselt üles ning mõõdeti vajum 10 mm täpsusega (vt Joonis 2.3). Betoonisegu koguti uuesti anumasse kokku ning segati.



Joonis 2.3 Betooni koonuse vajumi katse [autori erakogu]

2.1.5 Õhu sisaldus rõhumeetodil

Standardi EVS-EN 12350-7 [4] järgi tehti Air Entrainment Testing seadmega betoonisegu õhu mõõtmine rõhumeetodil (vt Joonis 2.4). Betoonisegu valati anumasse jälgides, et segusse jääva õhu kogus oleks väike. Anum täideti ja tihendati vibrolaul kahes kihis, arvestades betooni konsistentsi. Anuma kate ning ääred puhastati. Seejärel kinnitati anumale kate. Suleti õhu peakraan ning avati õhutuskraanid, sisestati vesi, kraanid suleti, pumbati anumasse õhku kuni skaalal näidatud algrõhunäiduni. Katse tulemused saadi, kui näit oli püsiv testnupu allhoidmisel. Eesti Betooniühingu auliige Enn Uustalu [19] on toonud välja, et efektiivseim õhu sisaldus betoonis on saavutatud siis, kui koonuse vajumine jääb 3–10 cm piirdesse.



Joonis 2.4 Betooni õhusisalduse mõõtmine rõhumeetodil [autori erakogu]

2.1.6 Katsekehade valmistamine ja kivilinemine

Katsekehad valmistati vastavalt standarditele EVS-EN 12390-1:2012 [66] EVS-EN 12390-2:2009 [67]. Igast segust tehti 2 katsekeha mõõtmetega 150 x 150 x 150 mm külmaskindluse katse jaoks. Vormid täideti kokku kolmes kihis ning kihid tihendati laboratoorsel vibrolaual. Katsekehad kaeti kilega ning hoiustati laboris 24 tundi temperatuuriga 20 ± 1 °C. Seejärel eemaldati katsekehad vormidest ja asetati veevanni kivilinema temperatuuril 20 ± 1 °C. Kuubikud kivilinesid 7 päeva ning siis asetati need hoidekambrisse, kus nad olid 21 päeva. Peale seda lõigati katsekehad vastavalt standardile EVS 814[2] ning valmistati ette külmaskindluse katseteks (vt Joonis 2.5), kui katsekehad olid 26 päeva vanad. Külmaskindluskatsed algasid siis, kui katsekehad olid 32 päeva vanad.



Joonis 2.5 Külmakindluse katseks ettevalmistatud katsekehad [autori erakogu]

2.1.7 Survetugevus

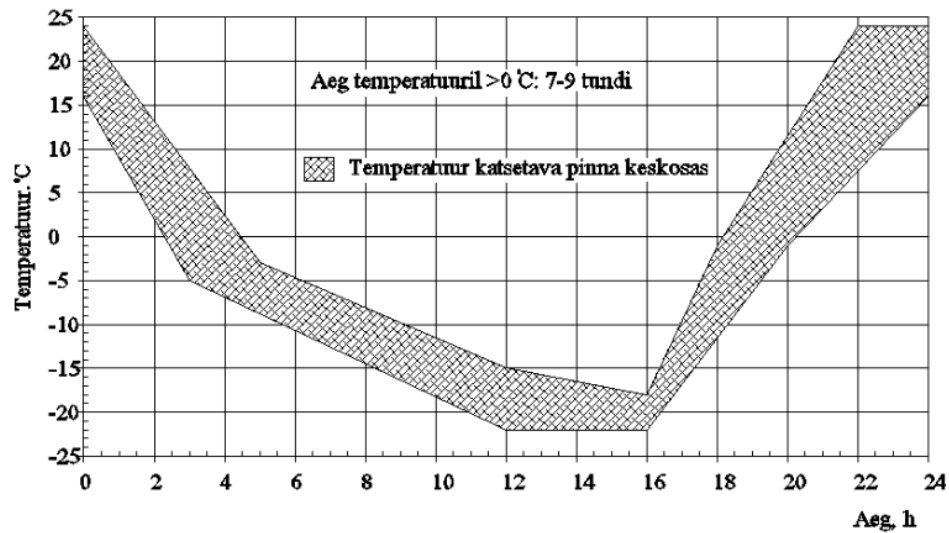
Survetugevuse katsete jaoks tehti igast segust 4 katsekeha mõõtmetega 100 x 100 x 100 mm. Koormuskatsed tehti vastavalt standardi EVS-EN 12390-3:2019 järgi 7 ja 24 päeva vanustele katsekehadele. Katse alguses puhastati katsekeha pinnad ning veenduti, et katsekeha puutuks kokku katsemasina plaatidega ja oleksid asetatud surumisele risti valamise suunaga. Katsekehad tsentreeriti täpsusega 1%. Valiti konstantne kiirus koormamiseks. Registreeriti suurim võimalik koormusnäit ning tulemused kanti katseprotokollile.

2.2 Külmakindluse katsete läbiviimine

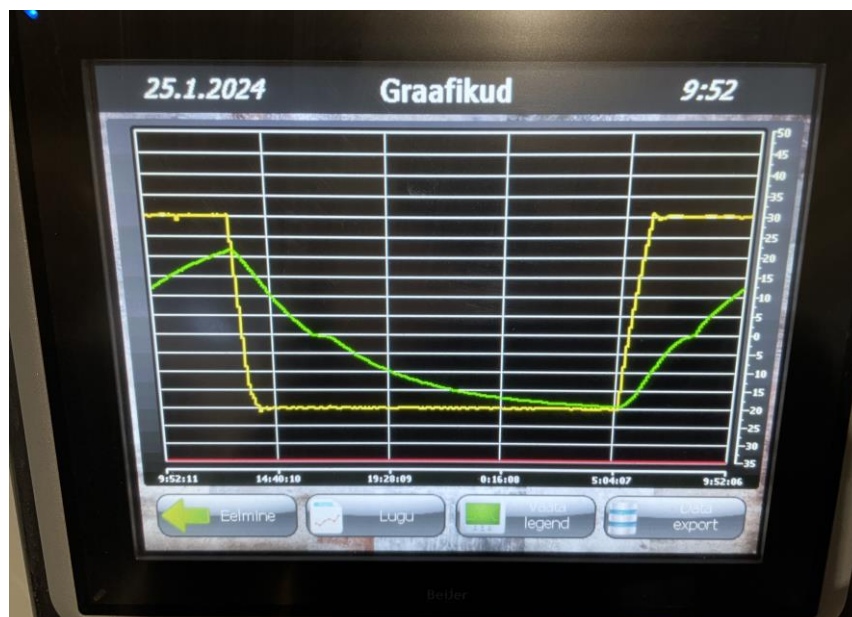
2.2.1 Koorunud materjali hulga katse

Betooni külmakindlust mõõdetakse peamiselt vastavalt standardile EVS 814, mis kehtestab betooni omaduste nõuded, sealhulgas külmakindlusele. [2] Pinnakooremise katsed teostati AS Teede Tehnokeskuse laboris. Eelnevalt kivinenud ja ette valmistatud katsekehad paigutati spetsiaalsesse kliimakambrisse, kus toimusid korduvad külmumise

ja sulatamise tsüklid. Vastavalt standardile EVS 814 [2] hoiti katsekehi tsüklite ajal kliimakambris 3%-lises naatriumkloriidi (NaCl) vesilahuses. Külmutustsüklid toimusid kliimakambris automaatselt vastavalt standardis EVS 814 [2] toodud graafikule (vt Joonis 2.6 ja Joonis 2.7).



Joonis 2.6 Külmutuskeskkonna temperatuuri-ajatsükkel katsetatava katsekeha pinna keskel [2]



Joonis 2.7 Katsete tegemiseks kasutatud külmutuskapi temperatuuri-ajatsükkel [autori erakogu]

Külmumis- ja sulamistsükkel kestab 24 tundi ning iga 7, 14, 28, 42 ja 56 tsükli järel võeti katsekehad kliimakambrist, et koguda murenenud materjal. Määratud tsüklite täitumisel võeti sulamisfaasi hetkel katsekehad kapist välja ning NaCl-i lahus valati paberfiltrisse koos murenenud materjaliga. Katsekeha pind puhastati veega nii, et vesi koguks murenenud materjali samamoodi filtrisse. Seejärel kraabiti murenenud materjali

pintsliga ning korrati veega puhastamise protseduuri. Sama tehti ka pintsliga ning metallist tilaga, mille abil katsekeha pealmiselt pinnalt vedelikku filtrisse valati. Seejärel pandi katsekehad koos naatriumkloriidi lahusega kliimakabrissesse tagasi. Paberfiltrisse kogunenud materjali mass määrati täpsusega 0,01 g (vt Joonis 2.8).



Joonis 2.8 Katsekeha puhastamine pärast külumumismõõtmisi [autori erakogu]

Pärast tsüklite lõppu hinnati betooni proove visuaalselt, et näha, kas tekkis pragusid, murenemist või muid külma kahjustusi. Saadud tulemusi (vt Tabel 2.2) võrreldi standardis EVS 814 [2] tabeliga (vt Tabel 1.7), et hinnata, kas betoon vastab kehtestatud külma kindluse nõuetele.

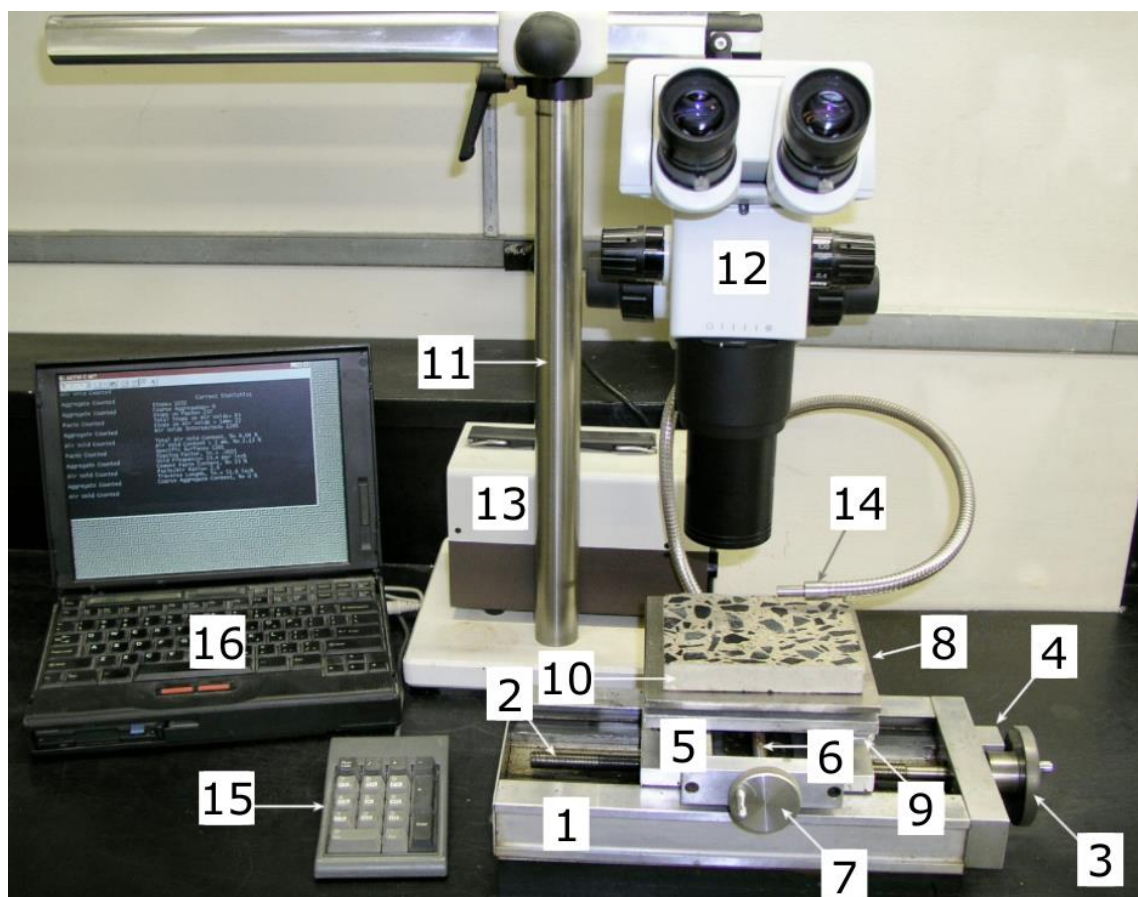
2.2.2 ASTM C457/C457M-16 standardi katsed

Mikroskoopiliselt uuritud pooride katsed viidi läbi Soomes Sweco Finland Oy ettevõttes standardi by72 „Betoontoodete kvaliteedi tagamine. Osa 1“ järgi. [62] Katsetamise ajaks olid katsekehad 28 päeva vanad. Katsekehad lõigati, pinnad lihviti ühtlaseks. Proovide võtukohas ei tohtinud olla pragusid või muid defekte, mis võiksid tulemusi mõjutada. Seejärel uuriti proove mikroskoobi all, et tuvastada ja analüüsida õhupooride jaotust, suurust ja omadusi. Selleks kasutati digitaalset pilditöötluse meetodeid. Kogutud mikroskoopiliste vaatluste põhjal arvutati õhupooride jaotus, suurused ja muud olulised parameetrid.

Analüüsi teostati mikroskoobi ja sobiva suurendusega, kus kasutati modifitseeritud punktloendusmeetodit, mille on välja töötanud standard ASTM C457M-16. Selle meetodi

puhul loendatakse õhutühimikke ja määratakse nende suurus ja arv. Tulemused saadi arvutades õhutühimike jaotuse ja nende omaduspindala, kasutades selleks spetsiaalseid valemeid. [62]

Katseseadme kirjeldus on joonisel (vt Joonis 2.9) üksikasjaliselt välja toodud, kus on näha katseseadme raam (1), alumine juhtkruvi (2), käsitsi juhitud väänt alumise liikumiskeerme pööramiseks (3), peatusseade punktloenduse positsioonide märkimiseks läbisõidujoonel (4), katsekeha alusraam (5), risti liikumiskeere (6), käsitsi juhitud nupp risti liikumiskeerme pööramiseks (7), proovikeha alus (8), proovikeha pinna tasandamise kruvid (9), proovikeha (10), mikroskoobi tugi (11), stereomikroskoop (12), valgusallikas (13), valgusti (14), andmete sisestamise klaviatuur (15), arvuti andmete kogumiseks ja salvestamiseks (16). [5]

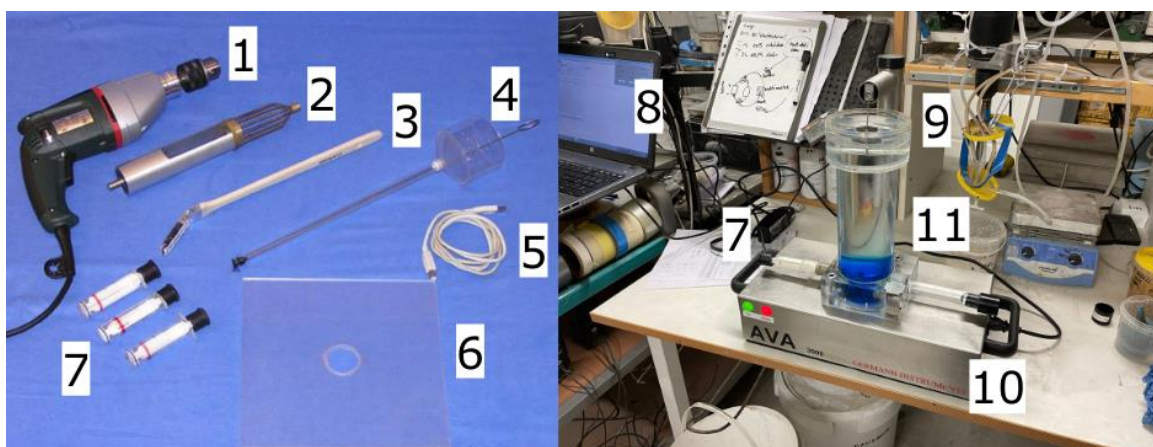


Joonis 2.9 ASTM C457/C457M-16 standardi katseseade [5]

2.2.3 AVA meetodi katsed

AVA meetodi katsed viidi läbi Remei Baltic OÜ laboris. Lisaks teostati välikatse ehitusobjektidel, kus võeti proov paigaldatud betoonisegust. Katsete jaoks kasutati AVA-3000 Germann Instruments seadet (10). Iga katse tegemisel seisis värske betoonisegu kõigepealt laboris suletud anumus 60 minutit. Mõõtmismasina silinder (11) täideti veega ning liigsed õhumullid eemaldati pintsliga (3). Seejärel võeti mõrdi proov betoonisegust vibreeriva traatpuuri abil (1 ja 2), mis välistab suuremad kui 6 mm osakesed. Proovi võtmiseks segust kasutati spetsiaalset katet (6) (vt Joonis 2.10 ja Joonis 2.11).

Proovi maht oli 200 ml ning see koguti süstla (7) abil. Veenduti, et proovis ei oleks liigset õhku. Järgnevalt süstiti proov AVA mõõtmismasina põhja, mille kohal asetseb õhumulle vabastav geel ja vesi. Mõrdiproovist hakkasid veepinnale eralduma õhumullid läbi doseeritud (4) geeli, järgides Stoke'i seadust: väiksemad õhumullid tõusevad aeglasemalt kui suuremad õhumullid. See seadus väidab, et üksiku, väikese ja sfäärilise osakese liikumiskiirus vedelikus on pöördvõrdeline osakese raadiusega, vedeliku viskoossusega ning kiirusega, millega osake liigub läbi vedeliku.



Joonis 2.10 AVA instrumendid ja mõõtmismasin [46]

Viskoosse ja lõhnatu iseloomuga sinise geeli tõttu säilitavad õhumullid oma esialgse suuruse ning ei ühine ega lagune väiksemateks mullideks. Katse ajal oli geeli ja vee temperatuur vahemikus 21 °C kuni -25 °C. Läbi veesamba tõusnud õhumullid kogunesid ümberpööratud klaasnõu alla (9), mis oli kinnitatud kaalu külge. Õhumullide rohkel kogumisel vähenes nõu kaal ning kaalu vähenemist registreeriti ajas.

AVA mõõtmismasin oli ühenduses (5) arvutiga, kus tarkvara (8) registreeris nõu massi muutuse ajafunktsioonina. Nendest tulemustest arvutati õhumullide paigutustegur ja eripind. Tundlik kaal, registreerib kausi massi muutuse. Arvuti kasutab algoritmi, mis

analüüsib kogutud õhutühimike suuruse jaotust ning nende arvutatud massi muutust ajas, arvutades eripinna kui õhutühimike kogupinna ja nende kogumahu suhte, väljendatuna mm^{-1} , ning vahekauguse teguri, mis on maksimaalne kaugus mis tahes punktist tsemendipastas kuni lähima õhutühimiku piirini, mõõdetuna millimeetrites.



Joonis 2.11 AVA proovi võtmine [autori erakogu]

Mõõtmist jätkati 25 minutit, välja arvatud juhul, kui massimuutus ei registreeritud 2 minutit järjest, sel juhul mõõtmine peatati. [41] Kvaliteetne külmaskindel betoon vajab tavaliselt õhumullide eripinda üle 25 mm^{-1} ja paigutustegurit alla $0,20 \text{ mm}$. Paigutusteguri ja eripinna hindamisel vaadati $d < 1 \text{ mm}$ tulemusi õhumullide korral, kuna neid õhumulle loetakse manustatud õhuks. Saadud tulemustes näidatakse õhu struktuuri, õhumullide eripinda ja vahekaugust ning graafikut õhumullide jaotuse kohta (vt Lisa 1).

2.3 Tulemused ja analüüs

Katsetulemused ja lähteandmed on toodud välja tabelis 2.2.

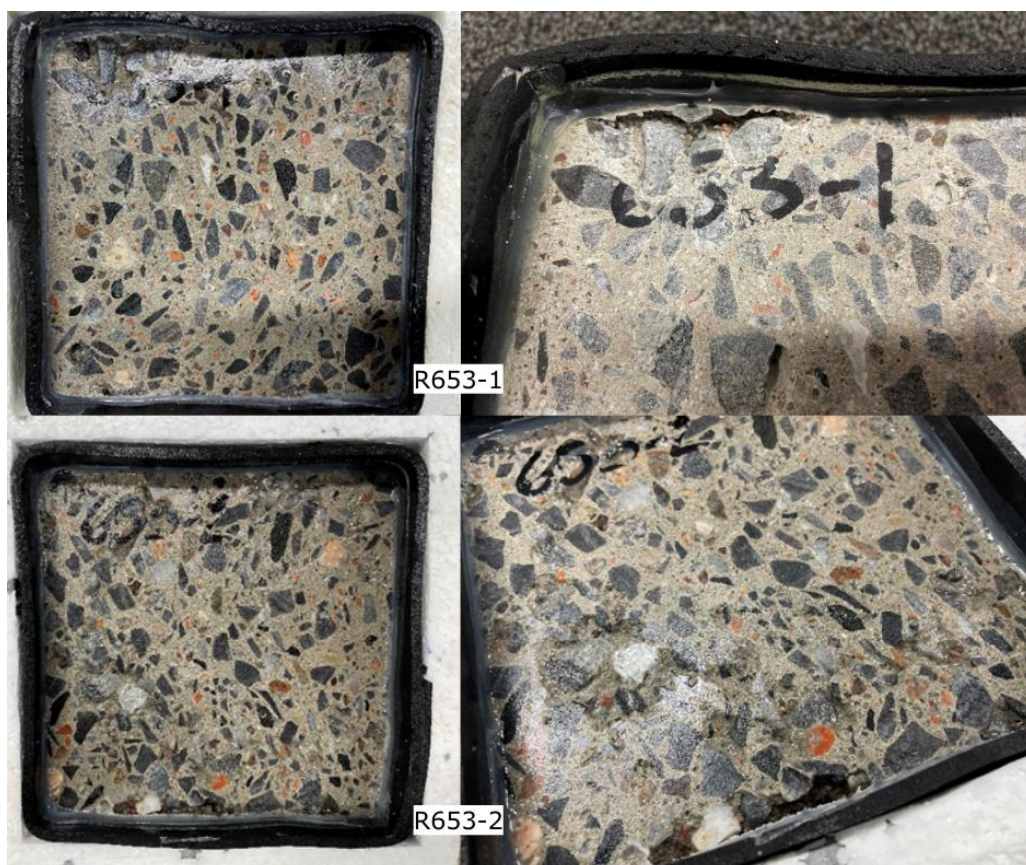
Retsept	Koonuse vajum, mm	Tsemendi kogus, kg/m ³	V/ts tegur	Vesi, kg/m ³	Peenliiv 0-2, kg/m ³	Jäme liiv 0-4, kg/m ³	Graniit 2-5, kg/m ³	Graniit 4-16, kg/m ³	Carboxyment 3400LL (FM), %	REBALit LP100 (LP)(1:40), %	Kuubiku tugevus Mpa 7 päeva	Kuubiku tugevus Mpa 28 päeva	Õhusisaldus rõhumeetodi järgi, %	AVA			Pinnakooremise meetodi katsetulemused, eraldunud mass pinnahiku kohta					S56/S28
														Õhusisaldus, %	Eripind, mm ⁻¹	Paigutustegur, mm	S7	S14	S28	S42	S56	
																	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	
R630	160	350	0,50	175	35,9	777,1	226,9	831,9	0,45	0,74	32,53	38,12	5,10	5,60	28,30	0,17	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	1,00
R632	225	375	0,50	188	86,9	679,6	219,8	806,0	0,44	0,29	30,27	33,77	5,30	6,40	25,40	0,17	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	1,33
R633	180	375	0,45	169	89,5	699,4	226,2	829,5	0,47	0,35	35,94	40,96	5,30	6,20	24,40	0,19	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	1,00
R636	180	375	0,45	169	-	797,0	226,2	829,5	0,46	0,23	39,98	42,96	4,90	6,60	20,60	0,20	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	1,12
R652	180	400	0,50	200	-	750,1	212,9	780,7	0,06	0,2	27,97	34,03	4,70	5,20	30,30	0,17	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	1,13
R653	170	400	0,45	180	-	773,9	219,7	805,4	0,5	0,27	38,75	43,99	5,00	5,40	18,80	0,26	0,07	0,14	0,25	0,35	0,44	1,76
R620	210	400	0,45	180	-	799,7	230,0	843,3	0,55	1,04	39,95	44,98	5,40	5,90	26,40	0,20	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	1,38
R643	160	400	0,40	160	-	797,7	226,4	830,2	0,76	0,4	47,93	55,88	4,50	4,40	23,50	0,22	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	1,25
R655	180	425	0,50	213	-	725,4	205,9	755,0	0,07	0,26	32,39	38,72	4,50	4,50	33,30	0,17	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	1,14
R645	210	425	0,45	191	-	750,6	213,1	781,2	0,4	0,25	38,62	45,47	4,30	3,70	17,20	0,35	0,06	0,09	0,13	0,16	0,2	1,56
R646	215	425	0,45	191	67,4	682,5	213,1	781,4	0,39	0,25	39,35	48,44	5,00	5,90	23,90	0,20	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	1,00
R644	235	425	0,40	170	-	776,0	220,3	807,7	0,7	0,42	44,97	51,1	4,50	4,40	24,90	0,22	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	1,00

Tabel 2.2 Katsetulemused ja lähteandmed

2.3.1 Katsekehade analüüs

Katsekehade üldisel vaatusel on näha, et ekstreemset murenemist toimunud ei ole. Katsekehadel, millel eeldati suuremat pinnakoorumist, on seda ka näha. Täpsemalt on prognoos välja toodud peatükis AVA tulemuste prognoos pinnakoorumisele. Kõige suurem pinnasekoorumine toimus R653 retsepti katsekehadel (vt Joonis 2.12). Katsekehasid analüüsides on näha, et peamine pinnakoorumine on toimunud tsemendipastas. On teada, et selline nähtus võib tekkida piisavalt tihedate ja külmakekindlate täitematerjalide korral. [22]

Kuna pinnakoorumine ei ole külmumis-sulamistsüklite järgselt kahanenud (vt Joonis 2.13) ega ühtlaseks jäänud, siis saab eeldada, et antud katsekehad murenevad järkjärgult edasi keskkonnategurite mõjul.



Joonis 2.12 Retsepti R653 katsekehad [autori erakogu]

Joonisel 2.12 on näha pinnakihistumisi, kus betooni pealmises kihis olevad tsemendipasta osad on aja jooksul eraldunud, paljastades täitematerjali. Mõned täitematerjalid on pinnalt eemaldunud, mis võib viidata külmatundlikkusele või

nõrkusele neis piirkondades. Selline kahjustus tekib tavaliselt, kui vesi betooni poorides külmub, paisub ja sulamisel jätab nõrgenenud struktuurid, mis võivad viia materjali lagunemiseni. Betooni üldmulje viitab sellele, et seda on mõjutanud mitu külmumis-sulamistsükli, mis on viinud struktuursete kahjustuste tekkimiseni.

Kahjustused betoonis on tihti seotud selle materjali poorse struktuuriga. Kui kasutatakse poorseid täitematerjale, on suurem tõenäosus, et need materjalid on algusest peale kahjustustele rohkem vastuvõtlikud. Vastupidi, kui täitematerjalid on tihedad ja tugevad, tekivad kahjustused enamasti tsemendipastas. Probleemne on ka jäme, mittekülmakindel täitematerjal, mille pooride suurus soodustab vee imendumist.

Külmudes vesi laieneb, tekitades pinget ja võib põhjustada kahjustusi, mida tuntakse kui *pop-outs* ehk välja hüppavad. Need tekivad tavaliselt külmatundlike täitematerjalide juures. Oluline on märkida, et täitematerjali üldine poorsus ei ole usaldusväärne indikaator selliste kahjustuste riskile, sest isegi madala poorsusega materjalid võivad olla nendele kahjustustele vastuvõtlikud. [6] [22]

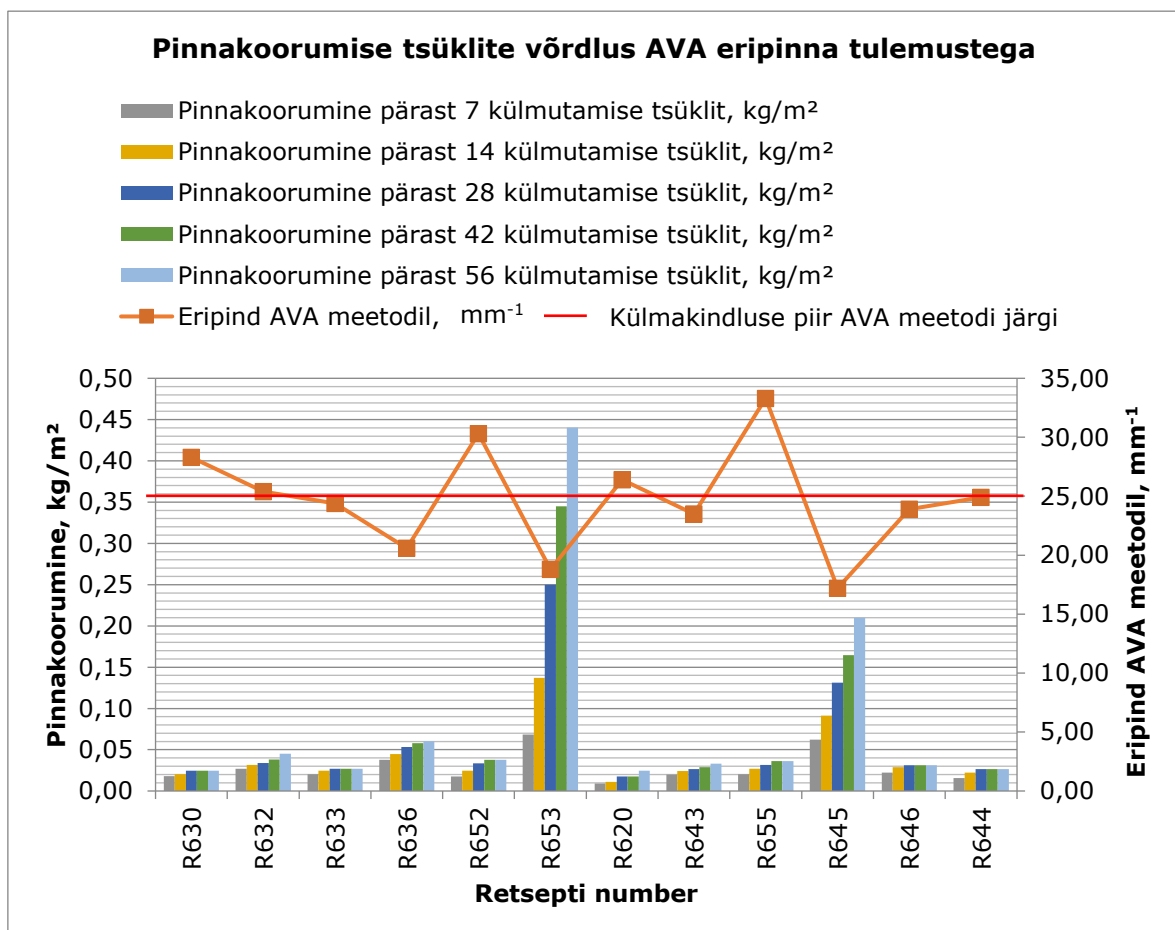
Täitematerjali lagunemist põhjustab enamasti selle veeimavus. Vee külmumine poorides suurendab ruumala ja tekib rõhk ning seejärel purunemine. Katsekehade analüüsimisel võib eeldada, et täitematerjalidest tingitud pinnakooremise põhjus võib olla nt täitematerjali ja tsemendipasta vaheline nõrk side, ebaühtlane täitematerjalide jaotus või ebapiisav täitematerjali külmakindlus.

Sarnaseid eeldusi saab teha ka tsemendipasta lagunemisel. Esiteks, kui tsemendipasta sisaldab liiga palju vett, võib külmumisest ja sulamisel tekkiv jää suurendada sisemist survet, põhjustades pragusid ja lagunemist. Teiseks, madal tsemendi kvaliteet või ebapiisav hüdratatsiooniprotsess võib jätta tsemendipasta nõrgaks, vähendades betooni vastupidavust külmumisest tingitud kahjustustele. Kolmandaks, ebapiisav õhu kaasahaaramine tsemendipastas vähendab betooni võimet taluda külmumisest ja sulamisest põhjustatud paisumist, suurendades lagunemise riski. Neljandaks, tsemendipasta ja täitematerjali vahelise nõrga sideme tõttu võib külmumisest tekkida liideses pragusid, mis viib lagunemiseni.

2.3.2 AVA tulemuste prognoos pinnakooremisele

Joonisel 2.13 on näha, et AVA tulemuste järgi ei oleks pidanud külmakindlust välja andma järgmised retseptid:

- R636 – pinnakoormine on suurenenud 0,0379 kg/m²-lt 0,0601 kg/m²-ni, muutus 0,0223 kg/m²;
- R633 – pinnakoormine on suurenenud 0,0202 kg/m²-lt 0,0269 kg/m²-ni, muutus 0,0067 kg/m²;
- R653 – pinnakoormine on suurenenud 0,0685 kg/m²-lt 0,4402 kg/m²-ni, muutus 0,3717 kg/m²;
- R643 – pinnakoormine on suurenenud 0,0199 kg/m²-lt 0,0331 kg/m²-ni, muutus 0,0132 kg/m²;
- R645 – pinnakoormine on suurenenud 0,0622 kg/m²-lt 0,2044 kg/m²-ni, muutus 0,1422 kg/m²;
- R646 – pinnakoormine on suurenenud 0,0222 kg/m²-lt 0,0311 kg/m²-ni, muutus 0,0089 kg/m²;
- R644 – pinnakoormine on suurenenud 0,0156 kg/m²-lt 0,0267 kg/m²-ni, muutus 0,0111 kg/m².



Joonis 2.13 Pinnakoormise tsüklite võrdlus AVA eripinna tulemustega

R633, R646 ning R644 retseptide puhul on joonisel 2.13 näha, et pinnakoormine ei näita olulist suurenemist tsüklite jooksul. See võib tuleneda sellest, et AVA tulemuste järgi olid nad väga lähedal nõutud eripinna tulemustele.

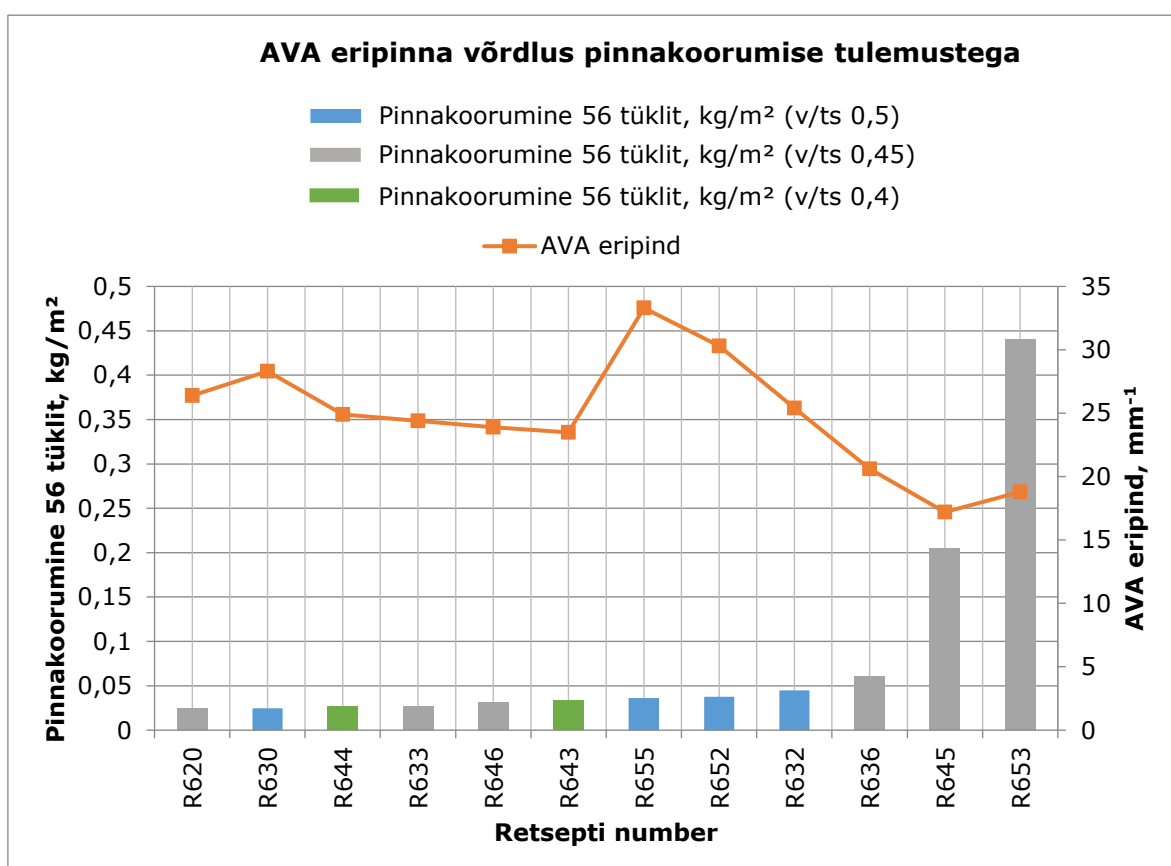
Nende tulemuste põhjal võib öelda, et retsept R653 on kõige ebasoodsama muutusega, kus pinnakoormine ületas oluliselt 0,2 kg/m² piiri pärast 56 külmutamissulatamistsükli, näidates sellega ebasoodsat külmakindlust. Ülejäänud retseptid näitavad samuti pinnakoormise suurenemist, kuid jäävad alla 0,2 kg/m² piiri pärast 56 tsükli.

Põhjus, miks võisid alla 0,25 mm⁻¹ eripinnaga katsekehad siiski osutada külmakindlaks, võib seletada mitmel viisil. Esiteks, muud betoonisegu komponendid võivad kompenseerida madalamat õhu eripinda. Näiteks võib kvaliteetse tsemendi või teatud lisandite kasutamine parandada segu külmakindlust. Teiseks, testimistingimuste erinevused. Standardis toodud soovitused põhinevad laialdasel uurimistööl ja testimisel, kuid tegelikud katsetingimused, nagu temperatuurimuutused, külmutamise-sulatamise tsüklite kestus ja intensiivsus, võivad mõjutada tulemusi. Võimalik, et teatud tingimustel osutuvad madalama eripinnaga segud külmakindlaks. Kolmandaks, eripinna mõõtmise täpsus ja varieeruvus. AVA meetodil mõõdetud õhu eripind võib sõltuda katsetamise protseduuridest ja tõlgendamisest. Väikesed kõikumised või mõõtmisvead võivad mõjutada tulemuste tõlgendamist. Neljandaks, külmakindluse iseloom. Külmakindlus ei sõltu ainult õhu eripinnast. Täitematerjalide kvaliteet, veesisaldus, tsemendi tüüp ja muud tegurid mängivad samuti olulist rolli. Teatud tingimustel võivad need tegurid aidata tagada külmakindluse isegi siis, kui õhu eripind on alla soovitusliku taseme. Ning viimaseks, katsekehade eripäraseid omadused. Võimalik, et katsekehadel, mis näitasid külmakindlust hoolimata madalamast õhu eripinnast, olid teised soodsad omadused või koostisosade kombinatsioonid, mis aitasid neil vastu pidada külmutamise-sulatamise tsüklitele.

Näiteks on uuringute [44] põhjal leitud, et kõrge tugevuse ja suhteliselt madala v/ts väärtusega betoon ei vasta standarditele, kuid on külmakindel. Kuigi standardid annavad üldjuhised betooni koostise ja omaduste kohta, sealhulgas soovitatavad õhu eripinna väärtused, võivad tegelikud külmakindluse tulemused varieeruda sõltuvalt mitmest tegurist. Katsete andmed näitavad, et betooni külmakindlus on keerukas omadus, mis sõltub laiaulatuslikust materjalide ja segamistingimuste kombinatsioonist, mitte ainult ühest näitajast, nagu õhu eripind.

2.3.3 AVA võrdlus traditsioonilise meetodiga

Kõik katsekehade andmed, mille eripind AVA meetodil on vähemalt 25 mm^{-1} , vastavad külmakindluse kriteeriumile, milles pinnakoormine on väiksem kui $0,2 \text{ kg/m}^2$ pärast 56 tsüklit. Selline tulemus on saadud 10 retsepti puhul, mis vastasid mõlemale kriteeriumile. See viitab sellele, et betooni koostisele esitatavate nõuete kohaselt suurem õhu eripind võib aidata kompenseerida suuremat v/ts suhet või väiksemat tsemendi kogust, tagades sellega külmakindluse.



Joonis 2.14 AVA eripinna võrdlus pinnakoormise tulemustega

Korrelatsioonikoefitsient on joonise 2.14 põhjal $-0,61$, mis näitab, et kui AVA eripind suureneb, siis pinnakoormine kalduvuslikult väheneb. See võib viidata sellele, et suurem eripind, mis tähendab peenemaid õhumulle, võib parandada betooni vastupidavust külmutamisele ja sulamisele, vähendades pinnakoormist. Negatiivne seos kinnitab, et materjalide ja tehnoloogiate valik, mis suurendavad AVA eripinda (näiteks õhu sisestamise meetodid ja lisandid), võib olla kasulik külma- ja külmumiskindluse parandamisel. Siiski tuleb meeles pidada, et korrelatsioon ei tähenda põhjuslikkust.

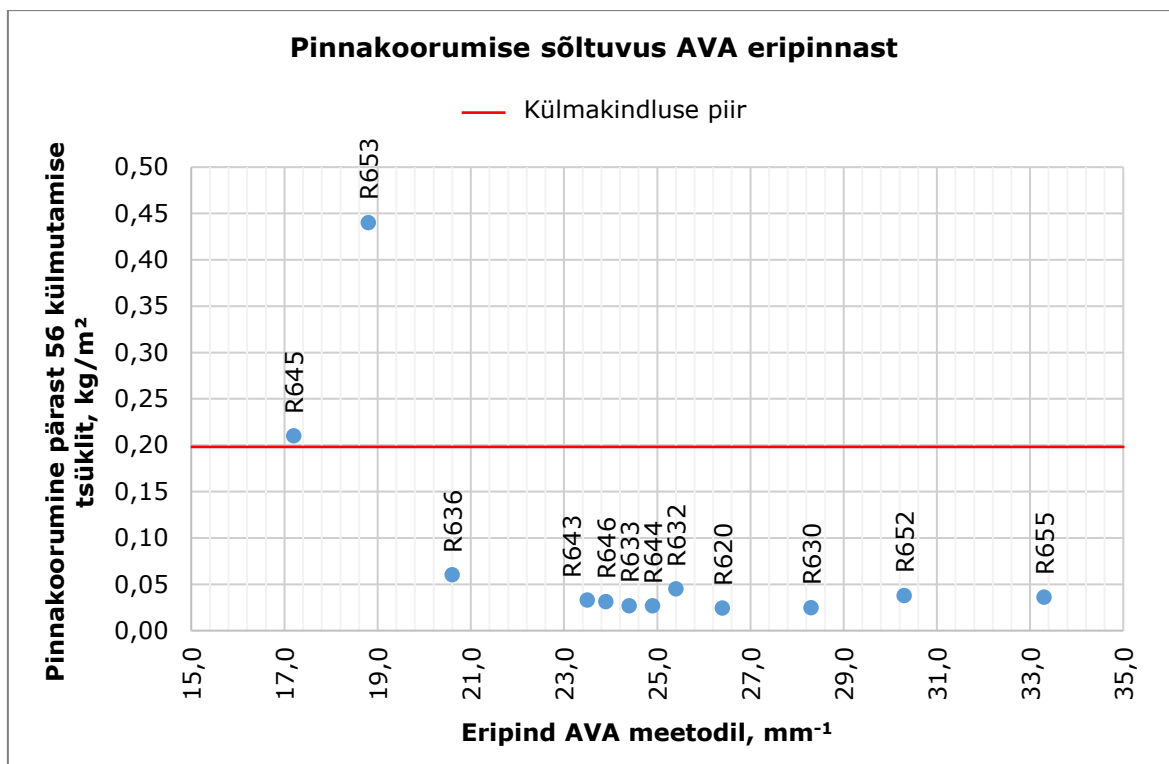
Näiteks saab arvutuste tulemuseks, et kui õhumullide eripind suureneb 10% võrra, siis külmaskindlus suureneb ligikaudu 33,6% võrra.

Retseptide R655 ja R652 puhul on näha, et AVA tulemused on teinud hüppe, kuid need ei ole mõjutanud kuidagi pinnakooremise tulemusi. Põhjuseks võib olla nt see, et eripinna muutus ei ole piisavalt suur, et mõjutada külmaskindlust mõõdetaval viisil. Kuigi AVA eripind ja pinnakooremise on omavahel seotud, võivad nende suhetele mõju avaldada ka muud tegurid, nagu betoonisegu koostis, tsemendi tüüp, täitematerjalid ja valmistamisprotsess. Lisaks võib eripinna mõõtmismeetod ja betooni proovide ettevalmistamine mõjutada tulemusi.

Objektikatse tulemused kinnitasid eeldusi, et betoonisegu on külmaskindel. AVA eripinna tulemus oli pärast betoonivalu $41,7 \text{ mm}^{-1}$ ning pärast 60 minutit $32,3 \text{ mm}^{-1}$. See näitab, et aja jooksul õhu eripind väheneb, kuid jääb siiski lubatud piiridesse. Pinnakooremise tulemuste keskmine oli $0,07 \text{ kg/m}^2$.

Üldiselt näitavad need tulemused, et AVA eripinna suurendamine võib olla üks viis betooni külmaskindluse parandamiseks, kuid lõplikud omadused sõltuvad paljudest teguritest. Betoonisegude arendamisel ja testimisel on oluline kaaluda kõiki aspekte, et saavutada soovitud jõudlus ja vastupidavus.

Joonis 2.15 näitab pinnakooremise sõltuvust AVA meetodil saadud eripinna tulemustest. Enamik andmepunkte, kus õhu eripind on suurem kui 20 mm^{-1} , näitavad madalamat pinnakooremist, mis on alla külmaskindluse piiri ($0,2 \text{ kg/m}^2$). Siiski on mõned andmepunktid, kus hoolimata kõrgest eripinnast, ületab pinnakooremise külmaskindluse piiri. Kahe retsepti katsekehad ei andnud külmaskindluse katseid välja. R653 ning R645 katsekehade külmaskindluse katsetamisel murenes materjali peale 56ndat tsükli rohkem kui $0,20 \text{ kg/m}^2$.

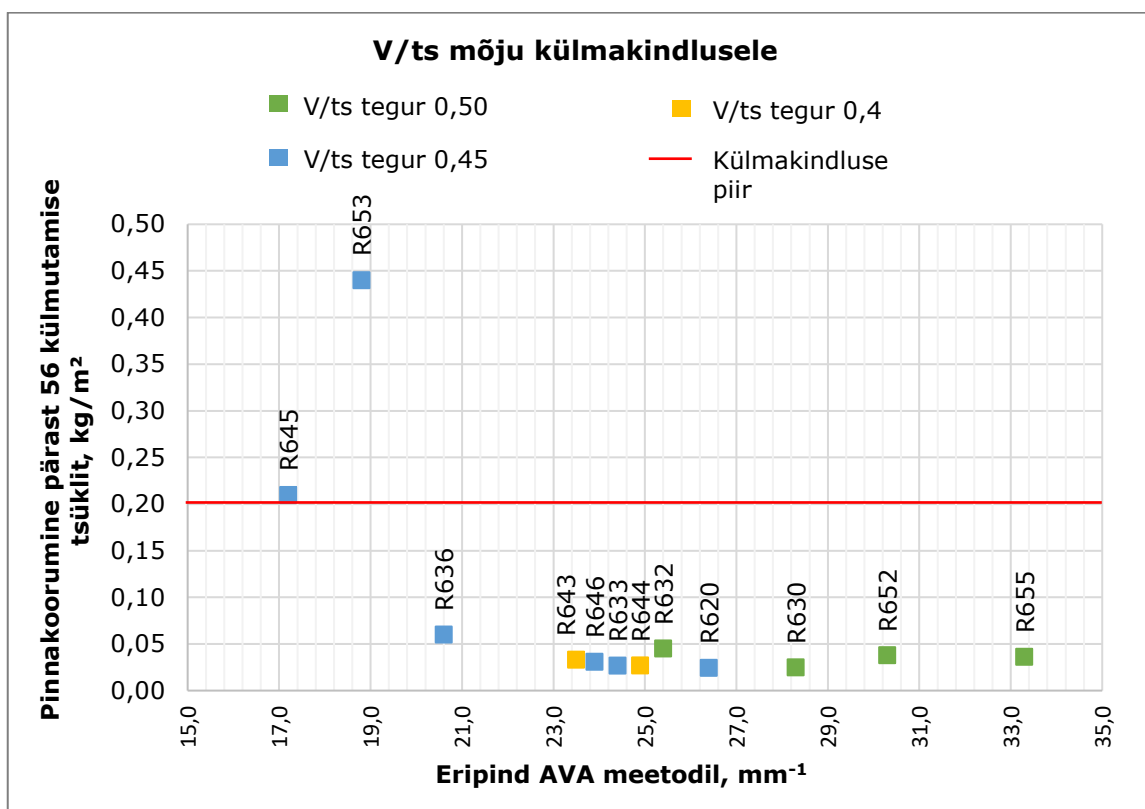


Joonis 2.15 Pinnakoormise sõltuvus AVA eripinnast

Retseptide R633, R636, R643 ja R646 puhul näeme, et kuigi AVA meetodil mõõdetud õhu eripind oli alla 25 mm⁻¹, olid nende segude katsekehad siiski külmakindlad, mis näitab, et külmakindlus ei sõltu üksnes õhu eripinna suurusest. Muud tegurid, nagu v/ts tegur, tsemendi kogus ja võib-olla ka segus kasutatud lisandid või täitematerjalid, mängivad samuti olulist rolli betooni külmakindluse tagamisel. See tõstab esile betooni koostise keerukust ja vajadust arvestada mitmeid erinevaid tegureid, et saavutada soovitud omadused ja vastupidavus külmakahjustustele.

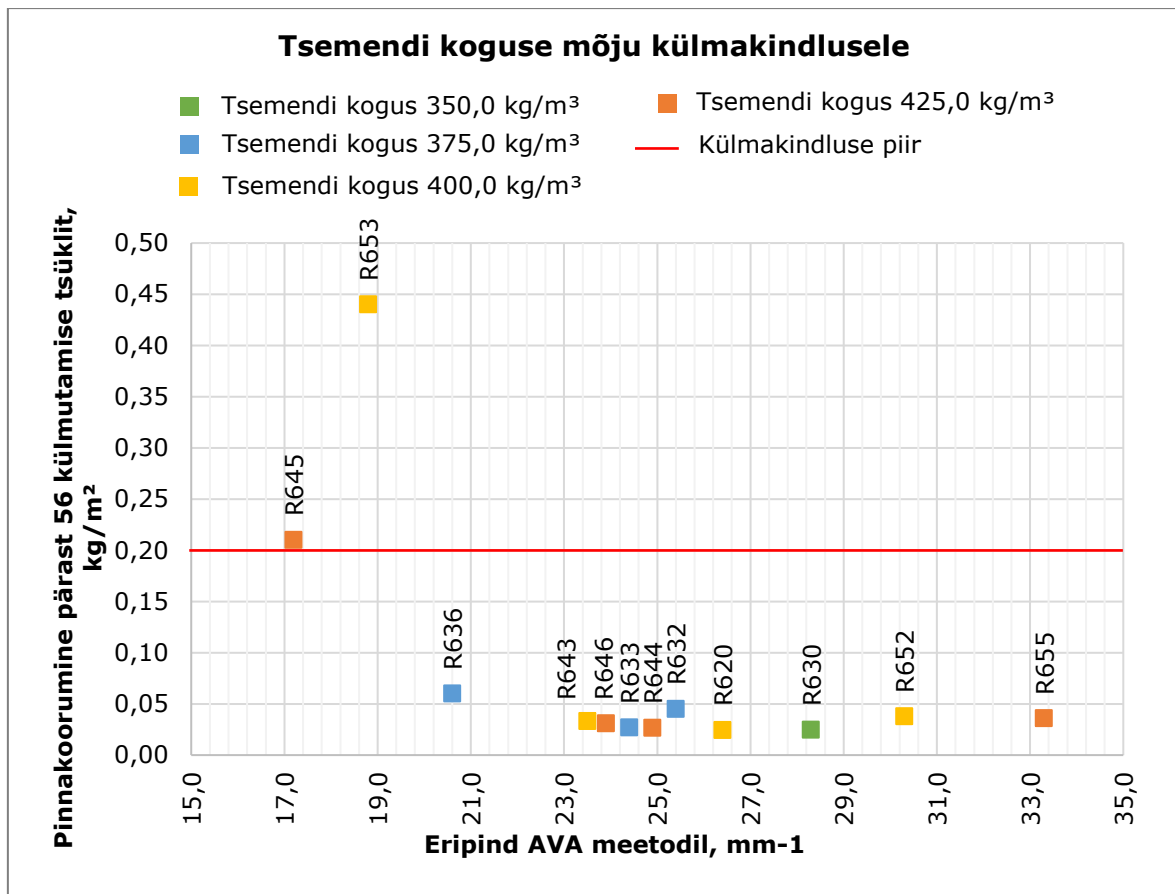
AVA masina tootja nõue, et AVA meetodil mõõdetud õhu eripind jääks alla 0,25 mm⁻¹, viitab sellele, et betoon ei pruugi olla külmakindel, põhineb üldistel suunistel ja uurimistöodel, mis näitavad, et teatud tasemel õhu sisaldus on vajalik vee laienemise mahutamiseks betoonis külmumisel, et vältida struktuurilisi kahjustusi. Siiski, nagu katsetulemused näitavad, on külmakindluse tagamine keerukam ja sõltub mitmest tegurist peale õhu eripinna.

Joonis 2.16 näitab, et madalama v/ts suhtega segudel on üldiselt madalam pinnakoorem, aga eripind mängib samuti olulist rolli. Suurema eripinnaga segud kipuvad säilitama madalamat pinnakoormist isegi suuremate v/ts suhete juures.



Joonis 2.16 Tsemendi koguse mõju külmakindlusele

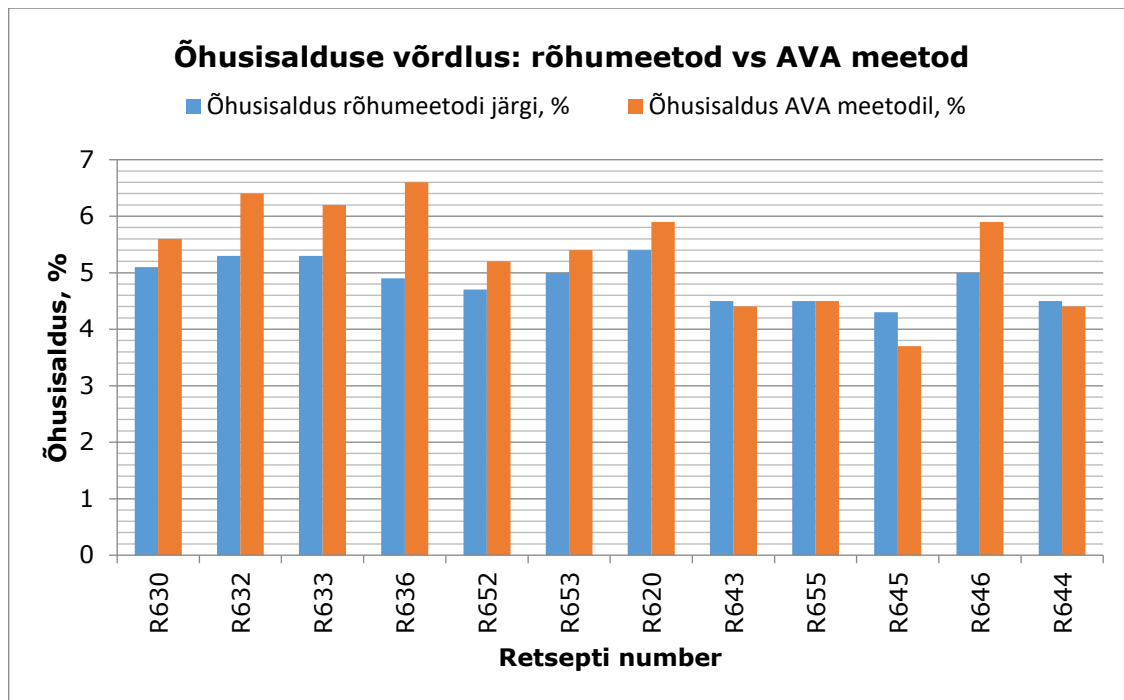
Joonis 2.17 näitab, et ei ole otsest seost tsemendi koguse ja pinnakooremise vahel, kuid õhu eripind mõjutab tulemust. Suurema eripinnaga retseptid näitavad üldiselt väiksemat pinnakoormist, sõltumata tsemendi kogusest.



Joonis 2.17 Tsemendi koguse mõju külmaskindlusele

2.3.4 AVA võrdlus rõhumeetodil saadud õhusisaldusega

Joonisel 2.18 on võrreldud õhusisaldust, mõõdetuna nii rõhumeetodil kui ka AVA meetodil, retseptide järgi. Iga retsepti puhul on näidatud mõlemad õhusisalduse väärtused, mis võimaldab visuaalselt hinnata kahe mõõtmismeetodi tulemuste erinevusi.



Joonis 2.18 Õhusisalduse võrdlus: rõhumeetod vs AVA meetod

Analüüsidest õhusisalduse erinevusi, mis on mõõdetud rõhumeetodi ja AVA meetodi abil, selgub, et keskmiselt on AVA meetodil mõõdetud õhusisaldus 9,14% suurem võrreldes rõhumeetodil saadud tulemustega. Erinevuste standardhälve on 12,82%, mis näitab märkimisväärset varieeruvust retseptide vahel. Erinevuste vahemik on lai, minimaalse erinevusega -13,95% (juhtumid, kus rõhumeetodi järgi mõõdetud õhusisaldus oli suurem kui AVA meetodil mõõdetud õhusisaldus) ja maksimaalse erinevusega 34,69%.

See varieeruvus erinevate retseptide vahel võib viidata mitmele asjaolule. Esiteks, mõõtmismeetodite eripärad võivad mõjutada tulemusi, kuna erinevad meetodid võivad tuvastada õhumulle erineval viisil. Teiseks, betoonisegude unikaalsed omadused, nagu koostisosade segu ja lisandite kasutamine, võivad samuti mõjutada õhumullide jaotumist ja seeläbi mõõtmistulemusi.

Rõhumeetodil tehtavad katsed tehakse kohe värske betooniseguga ning AVA katsed tehakse ligikaudu 60 minutit peale segu valmistamist. Ajaline vahe katsete tegemisel võib näidata õhusisalduse muutusi, mis tulenevad segus olevate õhumullide ümberjaotumisest, veesisalduse eraldumisest ja õhumullide liikumisest või lahustumisest segu sees. Lisaks, tsemendi hüdratatsiooniprotsess algab kohe pärast segamist ja see võib mõjutada õhumullide omadusi, kuna segu struktuur muutub kõvenemisel.

Üldiselt näitab see analüüs, et kuigi AVA meetod kalduvuslikult näitab suuremat õhusisaldust, on oluline arvesse võtta mõlemat mõõtmismeetodit ja segude omadusi, et saada täielik ülevaade betooni õhusisaldusest. Varieeruvus mõõtetulemustes rõhutab vajadust põhjaliku analüüsi järele, et mõista mõõtmismeetodite erinevuste mõju ja sellest tulenevaid praktilisi tagajärgi betooni omadustele ja jõudlusele. Mõlema meetodi tulemused on üsna sarnased, kusjuures väiksed erinevused on tõenäoliselt seotud meetodite spetsiifiliste karakteristikute või mõõtmise täpsusega. Kuigi vaadeldav andmekogum on väike, annab see esialgse kinnituse, et mõlemad meetodid on kooskõlas ja võivad pakkuda sarnast ülevaadet betoonisegude omadustest.

Et saada põhjalikumat teavet ja usaldusväärsemaid järeldusi, oleks soovitatav teha ulatuslikum uurimustöö, kaasates rohkem katsekehi ja erinevaid betoonisegusid. See aitaks kindlaks teha meetodite vahelise korrelatsiooni tugevuse ja annaks selgemaid juhiseid nende meetodite rakendatavuse kohta praktilistes olukordades.

2.3.5 AVA võrdlus ASTM C457/C457M-16 standardi meetodiga

Tabelis 2.3 on välja toodud kahe erineva retsepti (R461 ja R462) katsetulemused, kasutades AVA ja ASTM C457/C457M-16 meetodeid. Mõlemad meetodid on mõeldud betooni mikrostruktuuriliste omaduste, nagu õhusisalduse, eripinna ja paigutusteguri, mõõtmiseks. Analüüsime neid tulemusi, et tuvastada seosed ja erinevused.

Tabel 2.3 AVA ja ASTM C457/C457M-16 võrdlus

Retsept	AVA			ASTM C457/C457M-16		
	Õhusisaldus, %	Eripind, mm ⁻¹	Paigutustegur, mm	Õhusisaldus, %	Eripind, mm ⁻¹	Paigutustegur, mm
R461	5,50	32,60	0,14	5,40	36,00	0,12
R462	5,10	39,00	0,13	5,50	35,00	0,13

Mõlemal retseptil on AVA ja ASTM C457/C457M-16 meetodil saadud õhusisalduse protsendid üsna lähedased. Vahe on vaid 0,1% piires, mis näitab mõlema meetodi sarnast tundlikkust õhusisalduse mõõtmisel.

R462 eripind on AVA meetodil suurem kui R461, kuid ASTM meetodi järgi on R461 eripind veidi suurem. See võib viidata mõõtemetoodika või betooni segu spetsiifiliste

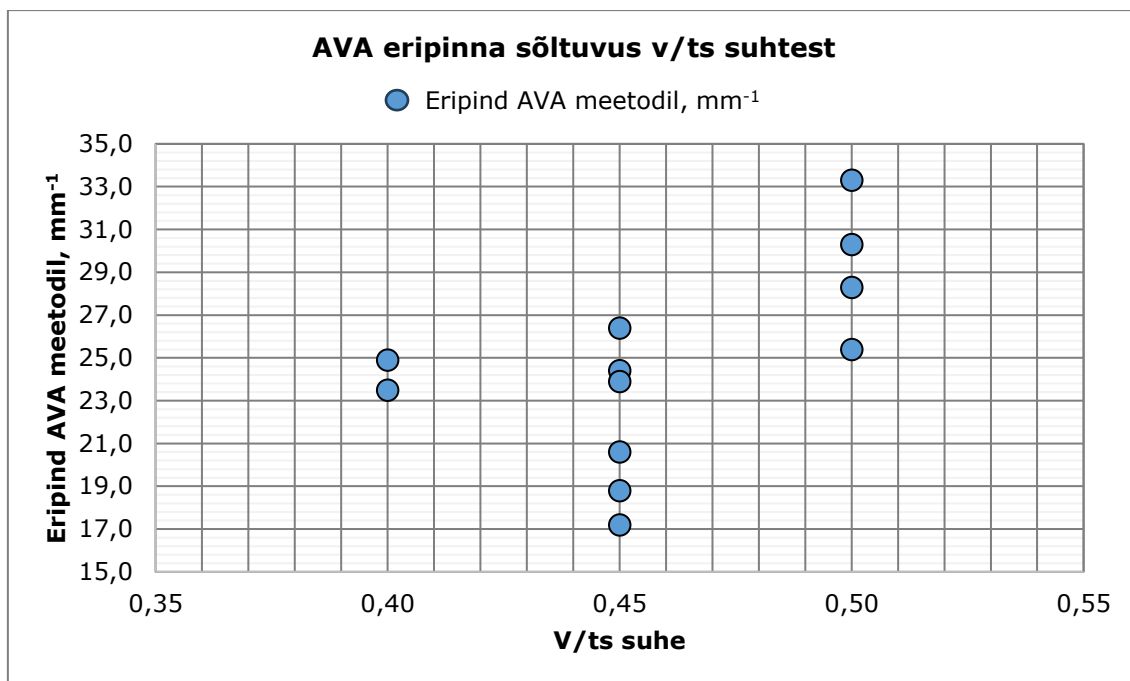
omaduste erinevustele, mis mõjutavad eripinna mõõtmistulemusi. ASTM meetod näib andvat suuremaid eripinna tulemusi võrreldes AVA meetodiga, mis võib tuleneda meetodite erinevustest materjali struktuuri hindamisel.

Paigutustegurid on väga sarnased mõlema retsepti puhul, kui võrrelda AVA ja ASTM meetodeid. R461 puhul on AVA meetodil saadud tulemus 0,02 mm suurem kui ASTM meetodil, samas kui R462 puhul on mõlemad meetodid andnud sama tulemuse.

AVA meetodi ja ASTM C457/C457M-16 standardi meetodi peamised erinevused tulenevad sellest, millal ja kuidas proove katsetatakse ning mida mõõdetakse. AVA meetodit rakendatakse värsketele betoonile. ASTM C457/C457M-16 standard mõõdab kõvenenud betooni mikrostruktuuri, tavaliselt pärast nädala möödumist, mis võimaldab betoonil kõveneda ja arendada struktuuriomadusi. Erinevus tuleb kindlasti ka metoodikast ja katse protseduurist.

2.3.6 AVA sõltuvus v/ts suhtest

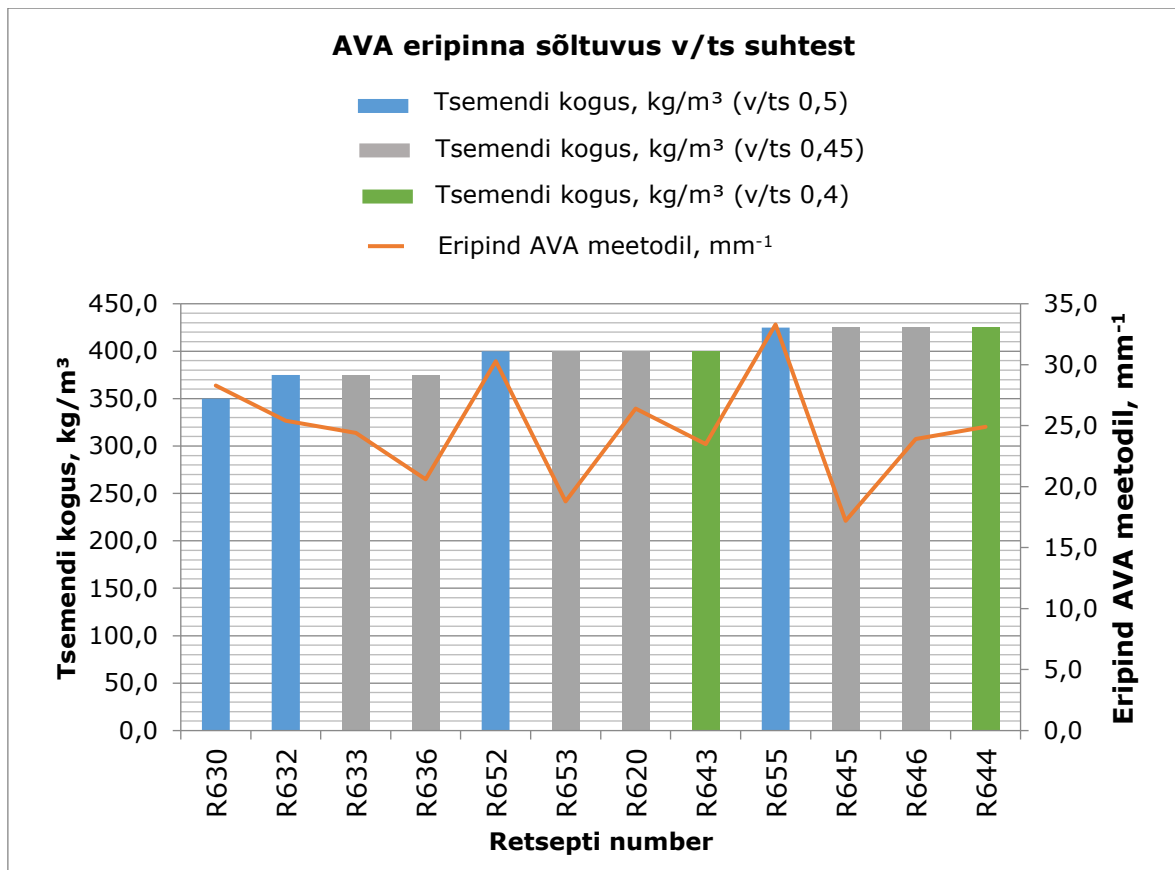
Joonisel 2.19 on näha AVA meetodi järgi saadud eripinna sõltuvust v/ts suhtest. V/ts suhtel on märkimisväärne positiivne korrelatsioon eripinnaga (0,54), mis viitab sellele, et suurem v/ts suhe võib soodustada suuremat eripinda. See on loogiline, kuna suurem veesisaldus segus võib suurendada pooride hulka ja suurust, mõjutades seeläbi eripinda.



Joonis 2.19 AVA eripinna sõltuvus v/ts suhtest

Andmete põhjal, kus AVA meetodil mõõdetud õhu eripind on vähemalt 25 mm⁻¹, näeme mitmeid näiteid, kus suurem õhu eripind kompenseerib suuremat v/ts suhet või madalamat tsemendi kogust, tagades külmakindluse. Retsepti R630 puhul on saadud õhumullide eripind 28,3 mm⁻¹, v/ts tegur 0,50, tsemendi kogus 350 kg/m³ ning pinnakoormine pärast 56 tsüklit 0,02 kg/m². Retsepti 632 puhul on saadud õhumullide eripind 25,4 mm⁻¹, v/ts tegur 0,50, tsemendi kogus 375 kg/m³ ning pinnakoormine pärast 56 tsüklit 0,05 kg/m². Retsept iR652 puhul on saadud õhumullide eripind 30,3 mm⁻¹, v/ts tegur 0,50, tsemendi kogus 400 kg/m³ ning pinnakoormine pärast 56 tsüklit 0,04 kg/m².

Joonisel 2.20 on näha, et v/ts suhe 0,40 koos 400–425 kg/m³ tsemendi kogusega võib kompenseerida õhu eripinda, mis on madalam kui 25 mm⁻¹, tõstes esile tsemendi koguse ja vee-tsemendi suhte tähtsuse külmakindluse kontekstis.



Joonis 2.20 AVA eripinna sõltuvus tsemendi kogusest

Tulemustest võib järeldada, et suurem õhumullide eripind AVA meetodil (vähemalt 25 mm⁻¹) aitab tagada külmakindluse, isegi kui v/ts suhe on 0,50, mis on suhteliselt kõrge, ja tsemendi kogus varieerub vahemikus 350 kg/m³ kuni 425 kg/m³. Külmakindlus, mõõdetuna pinnakooremisega pärast 56 tsüklit, jääb alla 0,2 kg/m² kõikidel juhtudel, mis näitab, et suurem õhumullide eripind võib tõesti kompenseerida teatud segu koostise parameetreid, nagu suurem v/ts suhe või väiksem tsemendi kogus, tagades sellega külmakindluse. Need tulemused toetavad hüpoteesi, et suurem õhumullide eripind võib aidata parandada betooni külmakindlust, muutes selle vastupidavamaks külmutamise-sulatamise tsüklitele.

V/ts suhte suurenemine betoonis suurendab segu poorsust, mis võib suurendada õhumullide eripinda. See on kooskõlas teadmisega, et suurem v/ts suhe viib tavaliselt väiksema tugevuse ja suurema pooride sisaldusega betoonini. Eripinna suurenemine võib viidata suuremale pindalale pooride ja betooni mikrostruktuuri sees, mis mõjutab nii mehaanilisi omadusi kui ka vastupidavust keskkonnamõjudele.

Retsepti R633 õhumullide eripind, mõõdetuna AVA meetodil, on 24,4 mm⁻¹, ja selle v/ts suhe on 0,45. Kasutatud tsemendi kogus on 375 kg/m³. Pärast 56 külmumis-

sulamistsüklit on täheldatud pinnakooremist 0,03 kg/m². Hoolimata asjaolust, et õhumullide eripind jääb alla 25 mm⁻¹, viitab madal pinnakooremine heale külmakindlusele. Siin võib madalam v/ts suhe ja mõõdukas tsemendi kogus koos suhteliselt kõrge õhu eripinnaga tagada piisava külmakindluse, mis näitab tasakaalustatud segu projekteerimist.

Retsepti R636 õhumullide eripind on AVA meetodil mõõdetuna 20,6 mm⁻¹, mis on märkimisväärselt alla standardi soovitusliku piiri. V/ts suhe on 0,45, tsemendi kogus 375 kg/m³ ja pinnakooremine pärast 56 tsüklit on 0,06 kg/m². See näitab, et isegi oluliselt madalam õhumullide eripind ei pruugi automaatselt viia külmakindluse kaotamiseni, eriti kui segu muud omadused, nagu vee ja tsemendi suhe ning tsemendi kogus, on optimeeritud, mis viitab, et külmakindlus on multifaktoriaalne omadus.

Retsepti R645 õhumullide eripind on 17,2 mm⁻¹ AVA meetodil, mis on palju madalam kui soovituslik, v/ts suhe on 0,45 ja tsemendi kogus on 425 kg/m³. Pärast 56 tsüklit on pinnakooremine 0,21 kg/m². Kuigi see katsekeha ületas külmakindluse piiri, näitab see näide, et väga madal õhumullide eripind võib saavutada aktsepteeritava taseme külmakindlust, kui teised segu komponendid on hoolikalt valitud. Suurem tsemendi kogus võib parandada segu koostist ja võib-olla osaliselt kompenseerida madalama õhu sisalduse puudujääke.

Katsete andmed viitavad sellele, et suurem õhumullide eripind aitab kaasa külmakindluse tagamisele, isegi kui segu sisaldab suuremat v/ts suhet või suuremat tsemendi kogust. Siiski, täpsustamiseks, suurem tsemendi kogus iseenesest ei nõua kompenseerimist külmakindluse osas, pigem on väljakutseks suurem v/ts suhe, mis võib suurendada külmakahjustuse riski, kuna rohkem vett segus tähendab suuremat jääkristallide teket külmutamisel, mis võib põhjustada struktuurilisi kahjustusi.

Andmete analüüs, mis keskendub katsekehadele, mille õhumullide eripind AVA meetodil on vähemalt 25 mm⁻¹, näitab järgmist:

- Selliseid katsekehasid on andmekogumis 5.
- Nende keskmine pinnakooremine pärast 56 külmutamise tsüklit on 0,0336 kg/m².
- Kogu andmekogumi keskmine pinnakooremine pärast 56 tsüklit on 0,0825 kg/m².
- Võrreldes üldise keskmisega, on selliste katsekehade pinnakooremine vähenenud umbes 59,3%.

Andmed näitavad, et suurem õhumullide eripind (mõõdetuna vähemalt 25 mm^{-1} AVA meetodil) aitab kompenseerida suurema v/ts suhte võimalikke negatiivseid mõjusid, tagades külmakindluse suhteliselt kõrge v/ts suhte juures. Külmakindluse paranemine nende tingimuste korral näitab ligikaudu 59,3% vähenemist pinnakooremises võrreldes üldise keskmisega. Kui v/ts suhe tõuseb 10% võrra, siis õhumullide eripind AVA meetodil suureneb protsendiliselt umbes 12,68%.

Suurem õhumullide eripind aitab parandada külmakindlust, võimaldades betoonis paremat vee ekspansiooni külmutamisel ja vähendades seeläbi struktureid kahjustusi. V/ts suhte ja tsemendi koguse mõju on keerukam. Kuigi suurem v/ts suhe tavaliselt suurendab külmakahjustuse riski, näib, et suur õhumullide eripind võib selle mõju kompenseerida. Suurem tsemendi kogus võib parandada segu tugevust, kuid samuti suurendada soolade kontsentratsiooni, mis omakorda võib mõjutada külmakindlust. Selles kontekstis ei ole küsimus niivõrd suurema tsemendi koguse kompenseerimises, kuivõrd selles, kuidas erinevad segu omadused mõjutavad lõpptulemust.

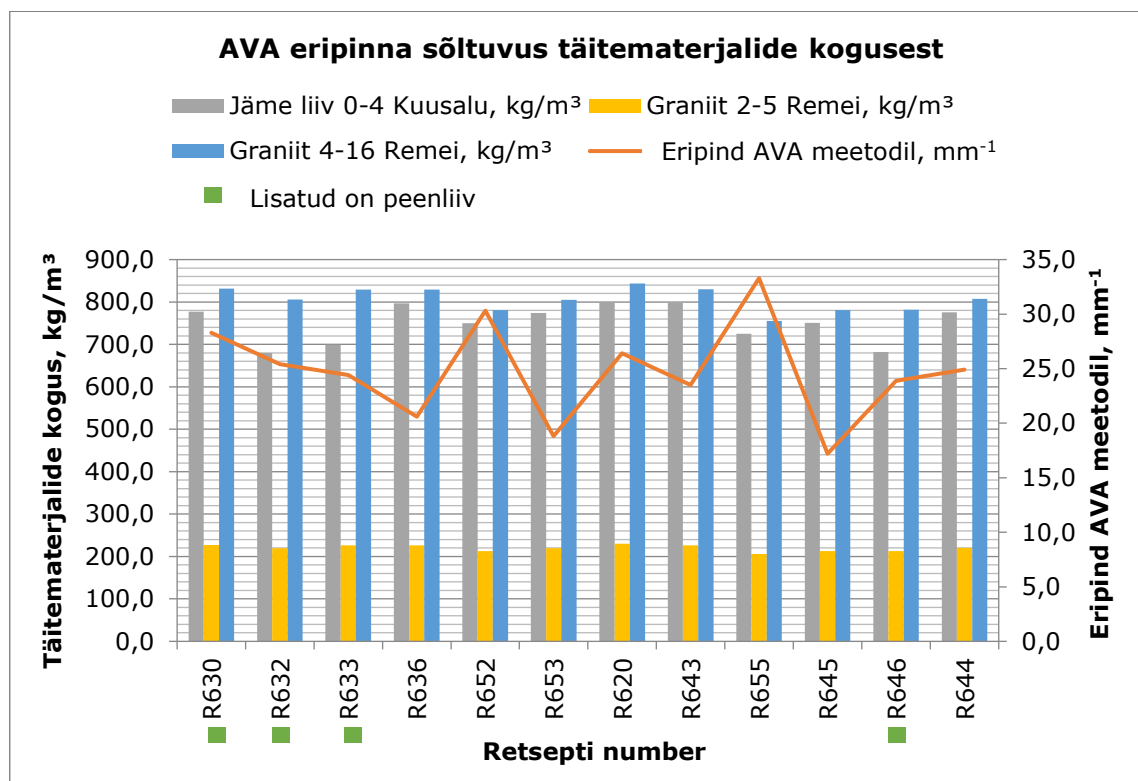
Saab järeldada, et andmed toetavad mõtet, et suurem õhumullide eripind võib aidata leevendada suurema v/ts suhte negatiivset mõju külmakindlusele. Tsemendi koguse osas ei ole andmetest otseselt järeldatav, et suurem kogus nõuaks kompenseerimist samas kontekstis, pigem on oluline mõista, kuidas kõik segu komponendid – õhumullide eripind, v/ts suhe, tsemendi kogus – koosmõjus mõjutavad betooni käitumist külmakindluse kontekstis.

2.3.7 AVA sõltuvus täitematerjalidest

Analüüsid täitematerjalide, vee ning õhu sisalduse mõju külmakindlusele ja AVA eripinna tulemustele, on oluline arvestada, kuidas need komponendid mõjutavad betooni mikrostruktuuri ja seeläbi selle käitumist külmumis-sulamistsükli ajal. Täitematerjalide, nagu peenliiva, jämeda liiva ja graniidi, samuti õhku manustavate lisandite olemasolu ja proportsioonid betoonis mängivad selles olulist rolli.

Joonisel 2.21 on näha retseptide R632 ja R633 puhul, et täitematerjalide kogused on suhteliselt sarnased. Täitematerjalide proportsioonid olid optimeeritud, et saavutada segu hea töödeldavus ja kompaktsus. V/ts suhe on mõlemal suhteliselt kõrge, mis tavaliselt suurendab külmumisriski, kuid siin oli see kompenseeritud teiste faktoritega. AVA eripind oli mõlemal retseptil suurem kui 20 mm^{-1} , kuid R633 retseptil oli alla

standardi soovitatud 25 mm^{-1} , mis näitab, et õhku manustava lisandi kasutamine oli piisavalt efektiivne, et tagada külmakindlus.



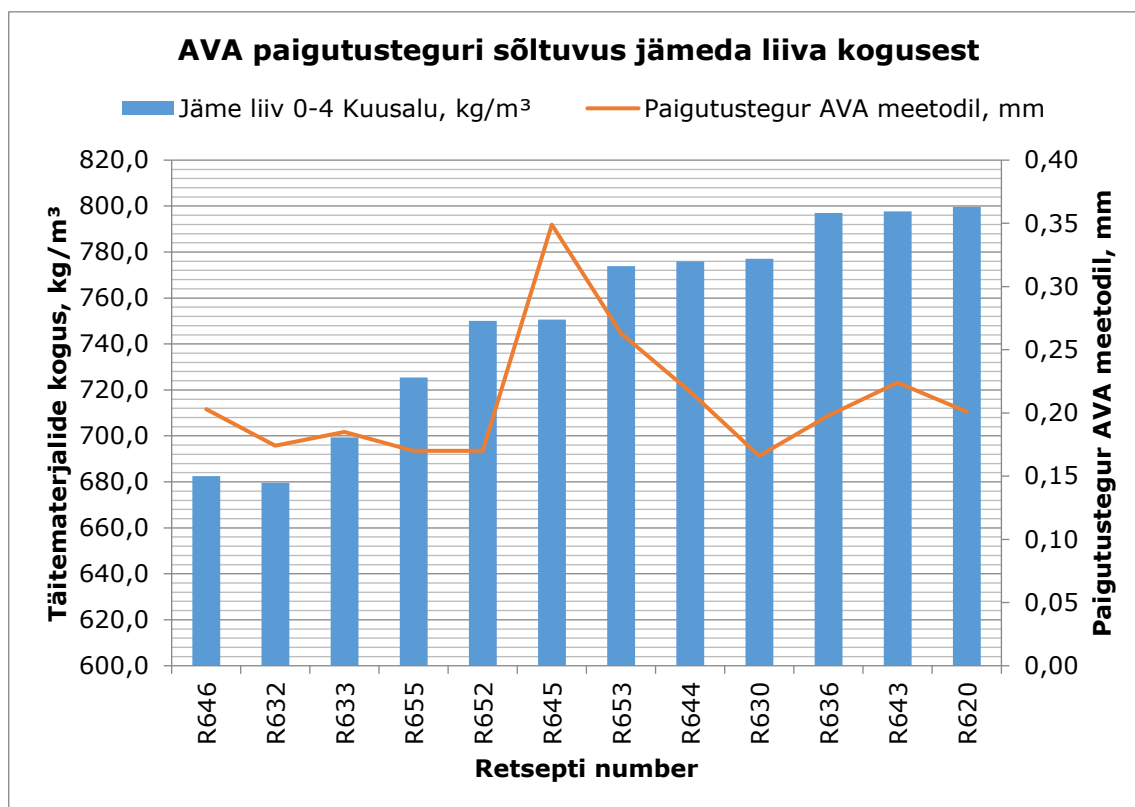
Joonis 2.21 AVA eripinna sõltuvus täitematerjalide kogusest

Katsetulemustest saame järeldada, et peenliiva ja jämeda liiva tasakaal aitab saavutada hea tiheduse ja vähendada poorsust, mis omakorda mõjutab soodsalt külmakindlust. Liiga palju peenliiva võib suurendada segu veevajadust ja vähendada õhuruumide jaotust. Graniidi kasutamine parandab segu kulumiskindlust ja võib kaasa aidata paremale külmakindlusele, kuna graniidist täitematerjalid on üldiselt vähem poorsete omadustega kui mõned teised täitematerjalid. Õhku manustavate lisandite kasutamine on kriitilise tähtsusega, kuna need aitavad luua mikropoorid, mis võimaldavad betoonil taluda külmutamisel tekkiva jää paisumist. Eriti alla 25 mm^{-1} eripinnaga katsekehade puhul on nende lisandite efektiivsus näidanud, et on võimalik saavutada külmakindlus ka siis, kui õhumullide eripind jääb alla soovitusliku piiri.

Tulemustest saab arvutada, et peenliiva puhul iga 1 kg/m^3 suurenemine on seotud keskmiselt $0,062 \text{ mm}^{-1}$ vähenemisega eripinnas. Jämeda liiva puhul iga 1 kg/m^3 suurenemine on seotud keskmiselt $0,0185 \text{ mm}^{-1}$ vähenemisega eripinnas. Graniidi puhul iga 1 kg/m^3 suurenemine on seotud keskmiselt $0,0333 \text{ mm}^{-1}$ vähenemisega eripinnas.

2.3.8 AVA sõltuvus liiva sisaldusest

Paigutusteguri ja jämeda liiva seos on välja toodud joonisel 2.22. Retseptis R632 on jämeda liiva sisaldus 679,6 kg/m³, paigutustegur 0,174 mm. Retseptis R645 jämeda liiva sisaldus 750,6 kg/m³, paigutustegur 0,349 mm. Retsepti R645 puhul, kus jämeda liiva sisaldus on suurem, on paigutustegur veidi madalam kui retsepti R632 puhul. See viitab sellele, et suurem jämeda liiva sisaldus võib mõjutada betooni töödeldavust ja vähendada paigutustegurit.

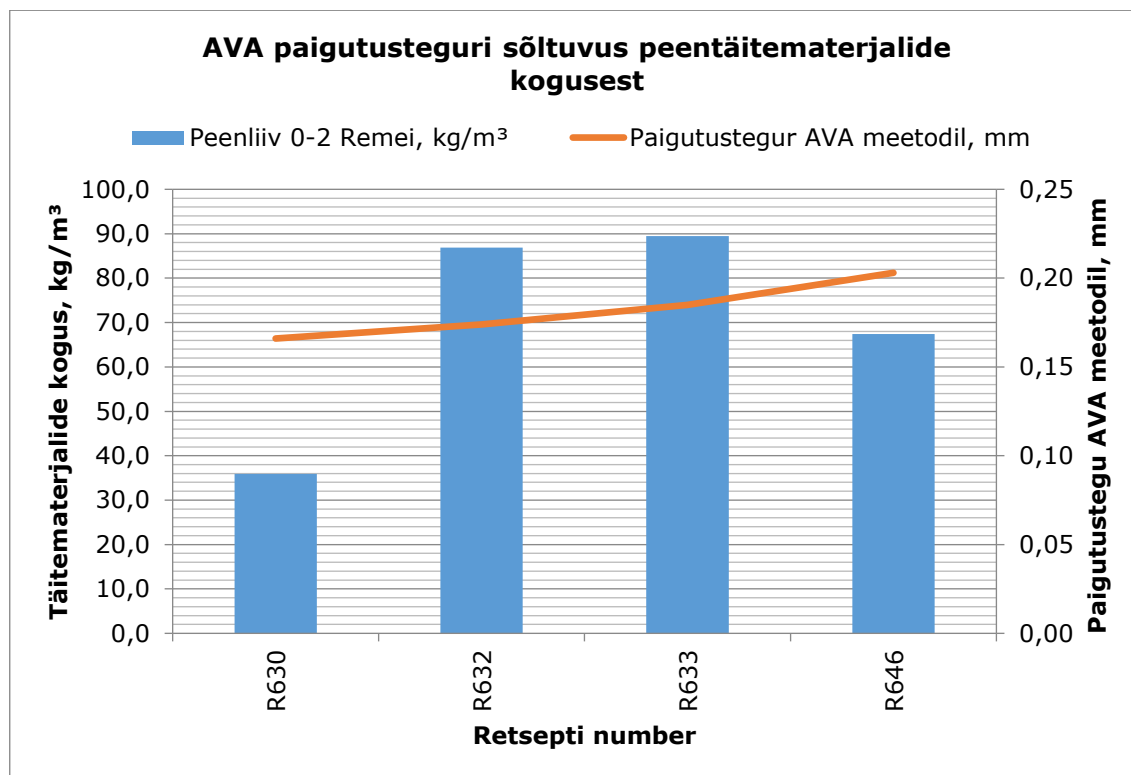


Joonis 2.22 AVA paigutusteguri sõltuvus jämeda liiva kogusest

Kuigi andmed näitavad teatud varieeruvust, ei tundu olevat selget trendi või seost jämeda liiva koguse ja paigutusteguri vahel eri retseptide lõikes. Mõned retseptid näivad olevat sarnase paigutusteguriga hoolimata erinevast jämeda liiva kogusest, samas kui teised näitavad suuremat dispersiooni. See tähendab, et teised betooni koostised mõjutavad ka paigutustegurit.

Jämeda liiva kogusel on positiivne korrelatsioon õhku manustava lisandi kogusega (0,44), kuid selle seos eripinnaga on nõrk (-0,18). See viitab, et jämeda liiva suurem sisaldus võib suurendada vajadust õhku manustava lisandi järele, pooride võimalikult ühtlase jaotumise tagamiseks betoonis.

AVA paigutusteguri saadud eripinna ning paigutusteguri mõjutamiseks muudeti segudes täitematerjalide kogust. Seetõttu on paaril segul kasutatud peentäitematerjali (0-2). Külmakindla betoonisegu korral peaks paigutustegur olema alla 0,20 mm. Tulemused on näha joonisel 2.23.



Joonis 2.23 AVA paigutusteguri sõltuvus peentäitematerjalide kogusest

Võrdleme retsepte, kus peenliiva sisaldus on erinev. R630 on peenliiva (0-2) sisaldus 35,9 kg/m³, paigutustegur 0,166 mm. R633 on peenliiva (0-2) sisaldus 89,5 kg/m³, paigutustegur 0,185 mm. Retsepti R633 puhul, kus peenliiva sisaldus on suurem, on paigutustegur veidi kõrgem kui retsepti R630 puhul, kus peenliiva sisaldus on madalam. See võib viidata sellele, et väiksem peenliiva sisaldus muudab betooni tihedamaks ja vähendab selle konsistentsi, mis omakorda võib vähendada paigutustegurit.

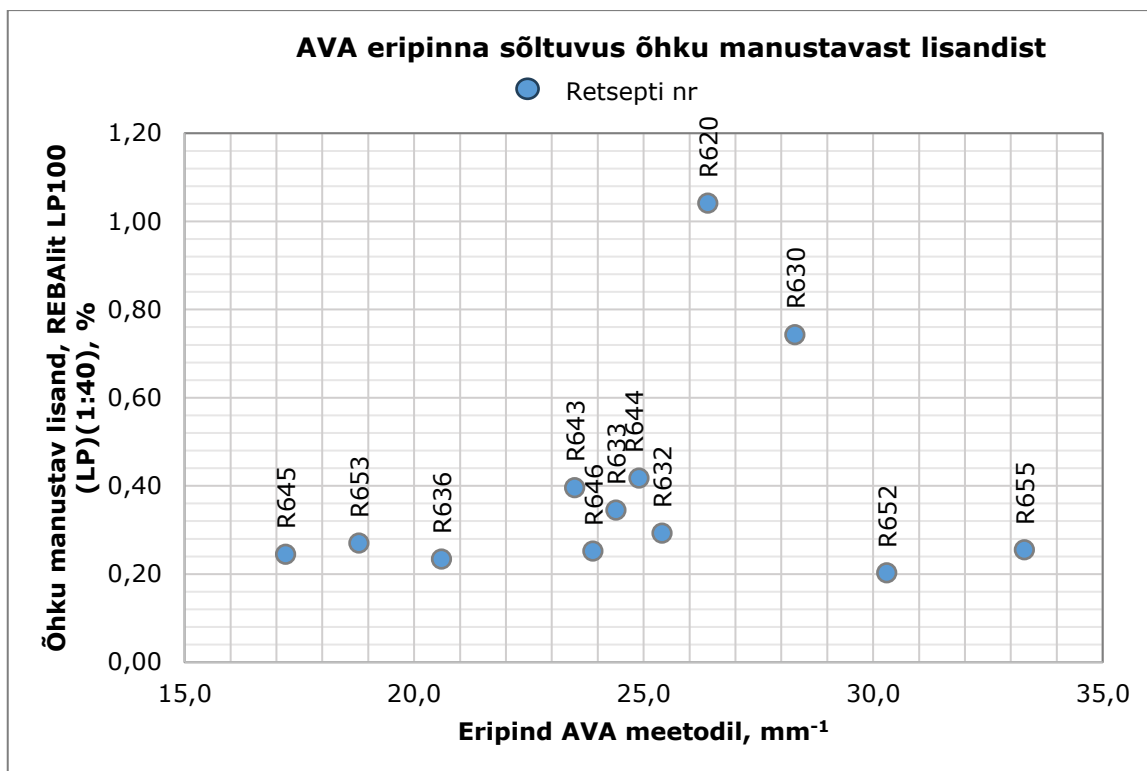
Seose analüüsimisel on oluline märkida, et kuigi mõned retseptid näitavad kindlat peenliiva kogust, ei pruugi paigutusteguri variatsioon olla otseselt seotud peenliiva kogusega, kuna see sõltub ka muudest retsepti komponentidest ja betooni segamise protsessi omadustest. Siiski, jooniselt 2.22 on võimalik tuvastada, kas mõned retseptid paistavad silma suurema või väiksema paigutusteguriga seoses peenliiva kogusega, pakkudes vihjeid retsepti optimeerimiseks.

Siiski, peenliiva kogusel on tugev negatiivne korrelatsioon nii eripinnaga (-0,78) kui ka õhku manustava lisandi kogusega (-0,84). See näitab, et suurem peenliiva sisaldus vähendab nii õhumullide eripinda kui ka vajadust õhku manustava lisandi järele. Kui peenliiva kogus suureneb 1% võrra, siis AVA meetodil saadud õhumullide eripind väheneb protsendiliselt umbes 0,18%. Peenliiva suurem sisaldus võib täita betooni mikropoorid, vähendades seeläbi õhumullide eripinda.

2.3.9 AVA sõltuvus õhku manustavast lisandist

Õhumullide eripinda muudeti õhku manustava lisandi kasutamisega ning peenema liiva koguse muutmisega (vt Joonis 2.24). Võrreldes nt R652 ja R620, siis mõlemas segus on v/ts 0,45, samad on ka vee ja tsemendi kogused. Õhumullide eripind on saadud R652 18,8 mm^{-1} ning R620 26,4 mm^{-1} . Muutus on saavutatud sellega, et R620 segusse on lisatud rohkem õhku manustavat lisandit ehk 1,041%, samas kui R652 sisaldab 0,27% õhku. Sama seost näeb ka R645, R646 ning R632 ja R633 betoonisegude võrdlemisel.

Korrelatsioonikordaja eripinna AVA meetodil ja õhku manustava lisandi koguse vahel on umbes 0,21, mis näitab nõrka positiivset seost kahe muutuja vahel. See tähendab, et kuigi on olemas teatav positiivne seos – kus suurema õhku manustava lisandi kogusega kaasneb tendentsiivselt suurem õhumullide eripind – ei ole see seos väga tugev. See viitab sellele, et kuigi õhku manustava lisandi kogus võib mõjutada betoonis olevate õhumullide eripinda, on betooni omadustele olulist mõju avaldavad ka muud tegurid.



Joonis 2.24 AVA eripinna sõltuvus õhku manustavast lisandist

Vaatame õhku manustava lisandi mõju AVA meetodi järgi saadud õhusisalduse tulemustele. Võrdleme retsepte R632 ja R633. R632: jämeda liiva sisaldus 679,6 kg/m³, õhusisaldus rõhumeetodi järgi 5,3%. R633: jämeda liiva sisaldus 699,4 kg/m³, õhusisaldus rõhumeetodi järgi 5,3%. Betoonisegudel on jämeda liiva kogus erinev, kuid õhusisaldus on identne. See näitab, et jämeda liiva kogus ei pruugi oluliselt mõjutada õhu sisaldust, vähemalt nendes konkreetsetes näidetes.

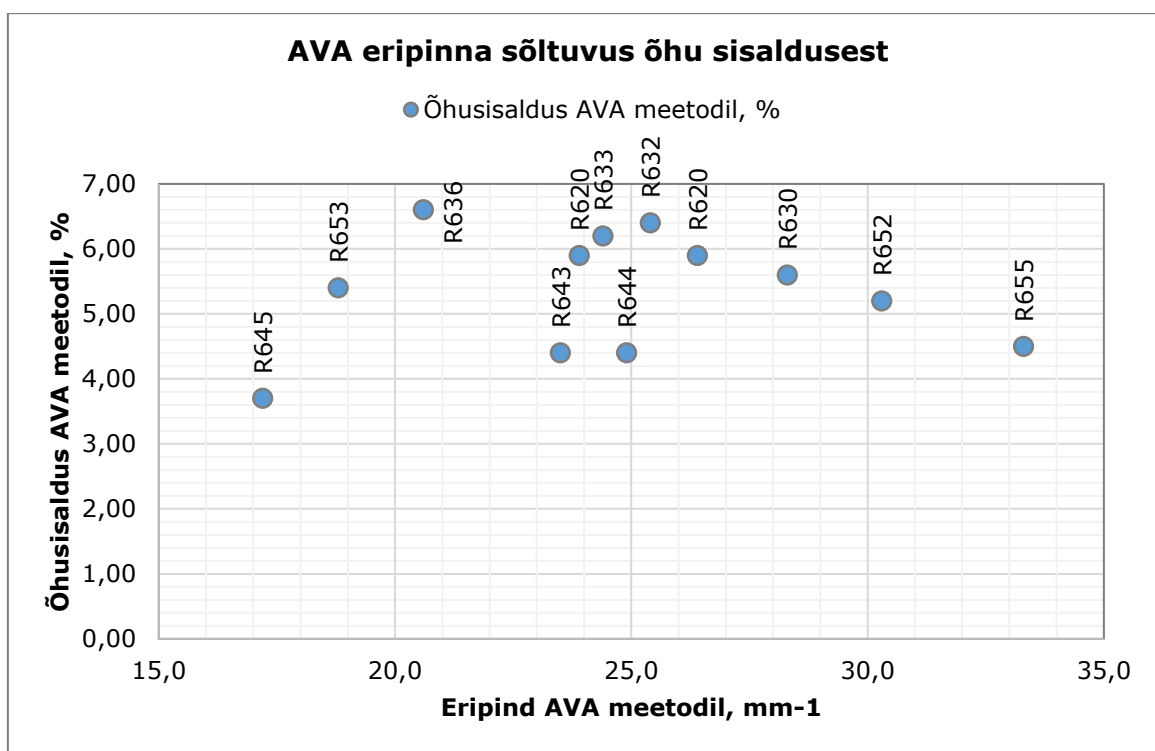
Kui võrrelda R644 ja R645 retsepte, siis nende õhu sisaldused on mõlemal 4,5%, kuigi on suur erinevus õhku manustava lisandi ja täitematerjalide osas. R655 REBALit LP100 (LP) doseering on 0,26%, jämeda liiva kogus on 725,4 g ning graniidi kogused on vastavalt 205,9 g ja 755,0 g. R44 REBALit LP100 (LP) doseering on 0,418%, jämeda liiva kogus on 776,0 g ning graniidi kogused on vastavalt 220,3 g ja 807,0 g. Nende retseptide puhul on õhu sisaldust reguleeritud v/ts teguriga, kuna mõlemal segul on tsemendi kogus 425,0 kg/m³, siis on muudetud vee kogus ning on saadud v/ts R655 puhul 0,5 ning R644 puhul 0,4.

Kui suurendada õhku manustava lisandi doseeringut 1%, siis on see seotud keskmiselt 3,84 mm⁻¹ suurenemisega eripinnas. Ehk kui õhku manustava lisandi kogus suureneb 1% võrra, siis AVA meetodil mõõdetud õhumullide eripind suureneb protsendiliselt umbes 15,51%.

Need näited illustreerivad, kuidas lisandite sisaldus ja muud komponendid võivad mõjutada õhu sisaldust betoonis ning kuidas erinevad retseptid võivad anda erinevaid tulemusi sõltuvalt kasutatud materjalidest ja proportsioonidest.

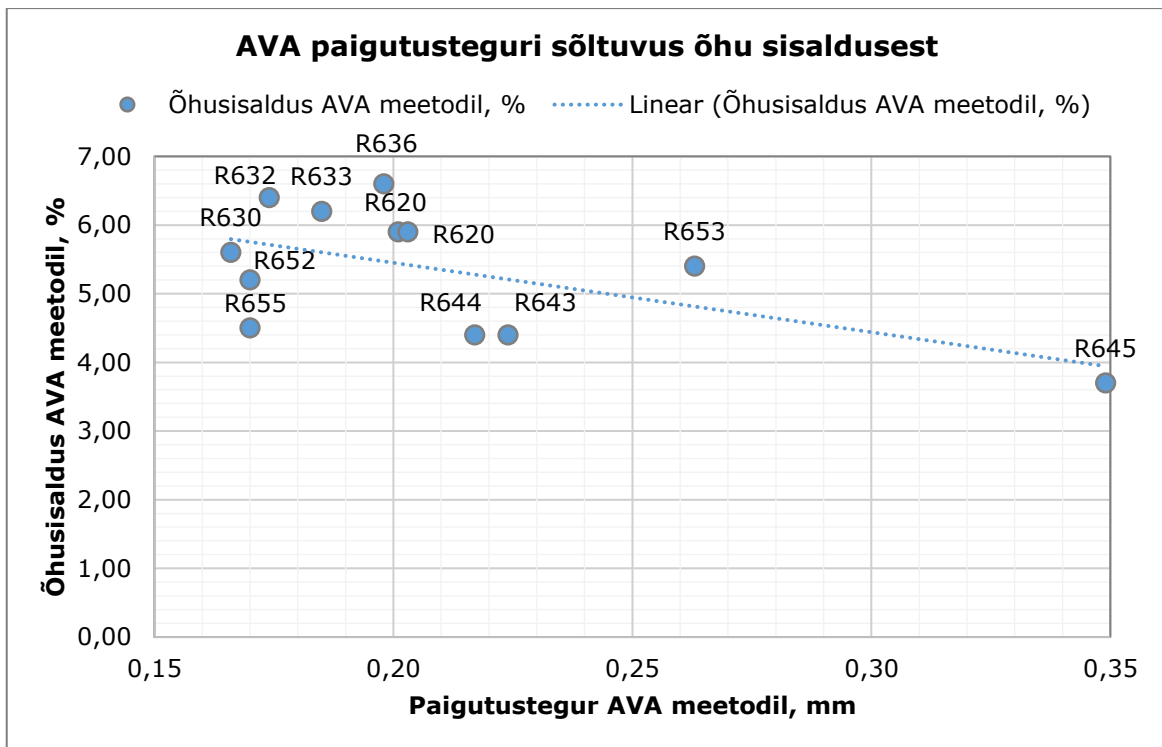
2.3.10 AVA sõltuvus õhu sisaldusest

Joonisel 2.25 on näha, et õhusisalduse ja eripinna vahel AVA meetodil ei paista esmapilgul olevat tugevat seost. See järeldus on kooskõlas korrelatsioonikoefitsiendiga, mis on 0,035. See väärtus viitab sellele, et kahe muutuja vaheline lineaarne seos on väga nõrk.



Joonis 2.25 AVA eripinna sõltuvus õhu sisaldusest

Joonisel 2.26 on näha, et õhusisalduse ja paigutusteguri vahel AVA meetodil võib olla seos. Korrelatsioonikoefitsient on -0,57, mis viitab mõõdukale negatiivsele lineaarsele seosele kahe muutuja vahel. See tähendab, et suurem õhusisaldus võib olla seotud madalama paigutusteguriga ja vastupidi. Kui õhusisaldus suureneb 1%, võime eeldada, et AVA paigutustegur väheneb keskmiselt umbes 0,0322 mm.

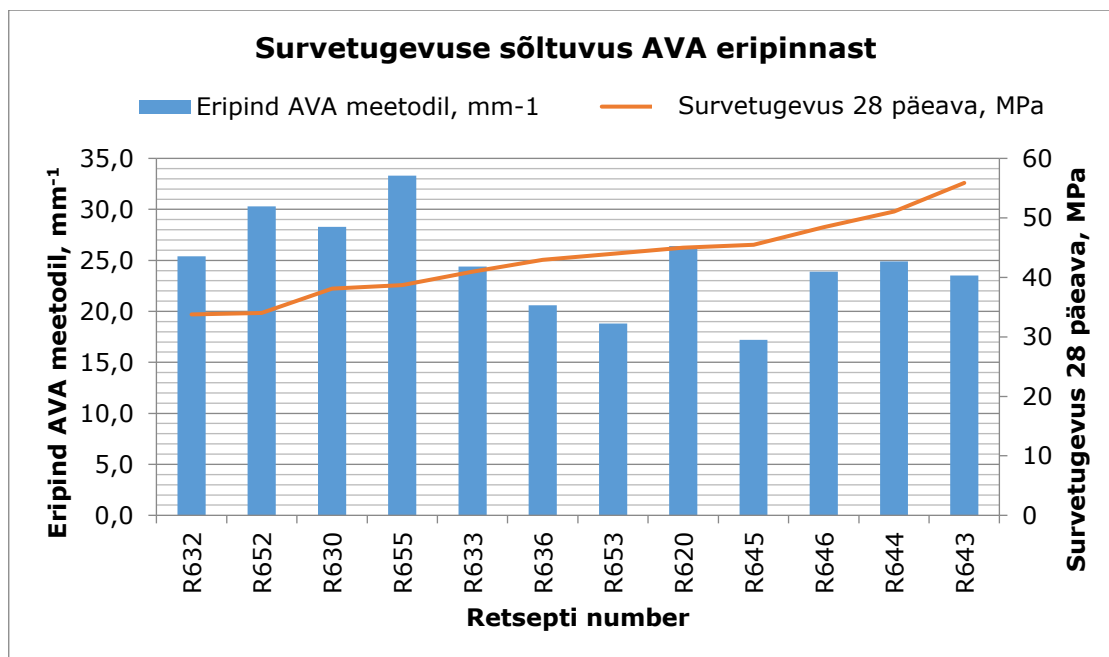


Joonis 2.26 AVA paigutusteguri sõltuvus õhu sisaldusest

Trendijoon näitab selgemalt negatiivset seost kahe muutuja vahel. See tähendab, et suurem õhusisaldus AVA meetodil kipub olema seotud väiksema paigutusteguriga, mis võib osutada sellele, kuidas õhumullide olemasolu betoonis mõjutab selle paigutatavust.

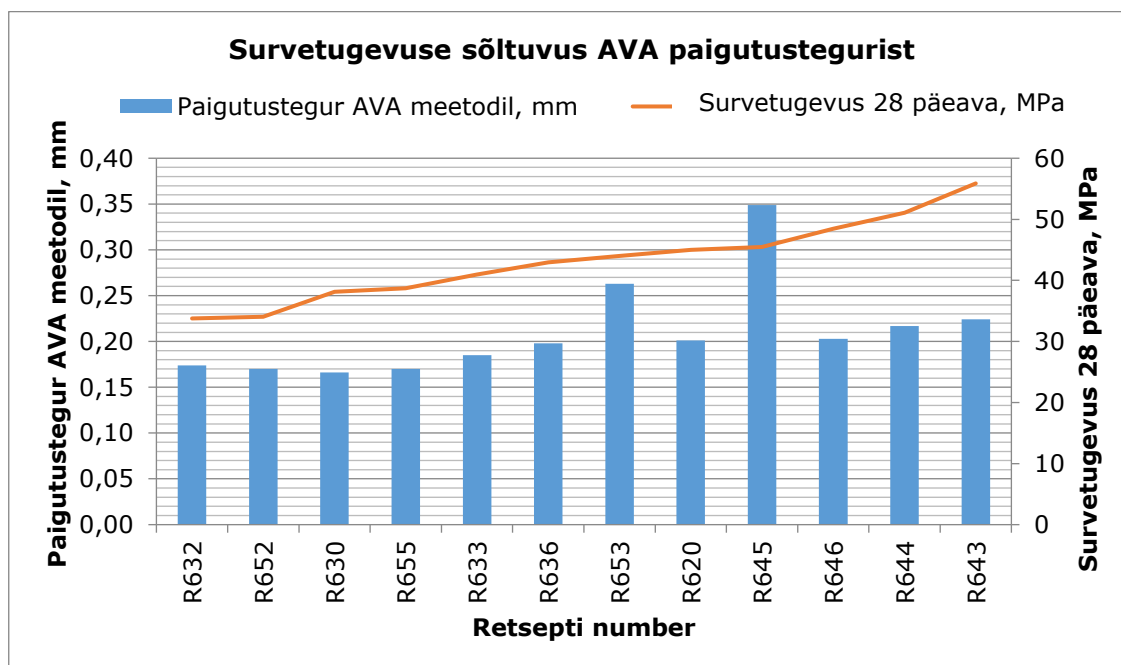
2.3.11 Survetugevuse sõltuvus AVA-st

AVA katsetega saadud eripinna ja 28 päeva survetugevus on mõõdukalt negatiivselt korreleerunud (-0,45). See tähendab, et suurema eripinnaga proovidel on madalam survetugevus. See võib viidata sellele, et suurema pooride pindalaga materjalid, mis võivad olla seotud suurema õhusisaldusega, on vähem tihedad ja seega nõrgemad (vt Joonis 2.27).



Joonis 2.27 Survetugevuse sõltuvus AVA eripinnast

Paigutusteguril on samuti mõõdukalt positiivselt korreleerunud 28 päeva survetugevusega (0,45) (vt Joonis 2.28). See viitab, et parema töödeldavusega segud, mis on kergemini paigutatavad, võivad viia suurema tugevuse arenguni.



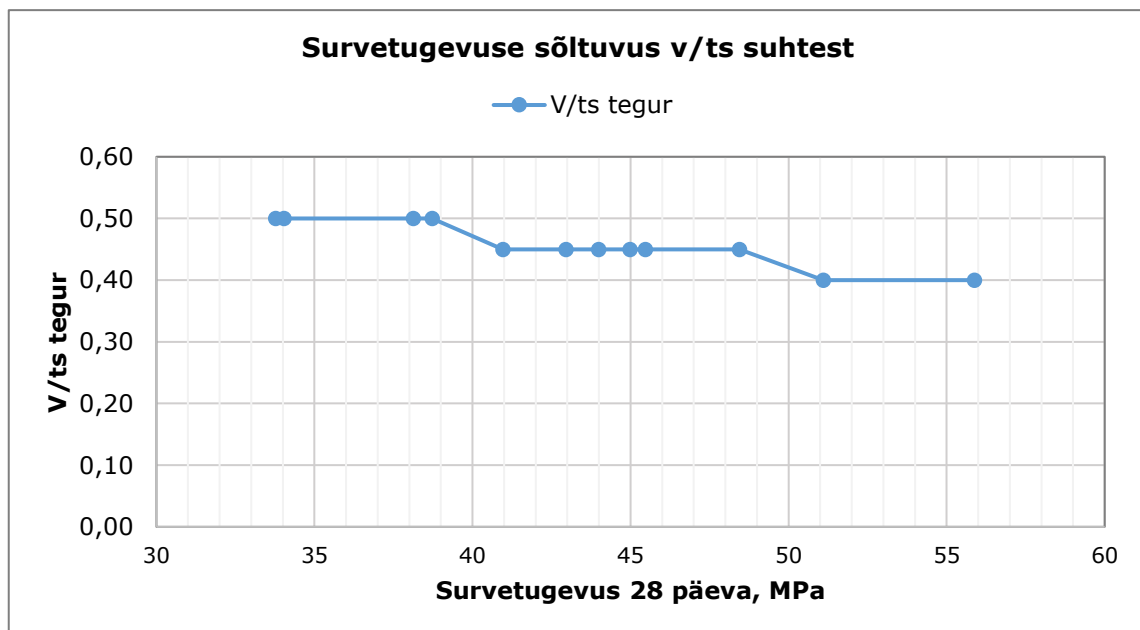
Joonis 2.28 Survetugevuse sõltuvus AVA paigutustegurist

Väga tugev negatiivne korrelatsioon v/ts suhte ja 28 päeva survetugevuse vahel (-0,9311) näitab, et suurema veesisaldusega segudel on märkimisväärselt madalam tugevus. See on kooskõlas tavapärase betoonitehnoloogia tundmisega, kus madalam

v/ts suhe viib suurema tugevuseni. Tugev negatiivne korrelatsioon tuleneb asjaolust, et madalam v/ts suhe põhjustab betoonis tihedama ja vähemporse struktuuri, mis parandab survetugevust.

Vähem vett tagab optimaalse hüdratatsiooni ja väiksemad kapillaarpoorid, mis viib tugevama tsemendikivi tekkimiseni. Samuti, kuigi madal v/ts suhe võib vähendada segu töödeldavust, võib see suurendada betooni vastupidavust ja vähendada mahukahanemist, mis kokkuvõttes aitab säilitada tugevust pikemas perspektiivis. Kui AVA meetodil mõõdetud õhumullide eripind suureneb 1% võrra, siis kuubiku tugevus väheneb ligikaudu 0,032 MPa võrra.

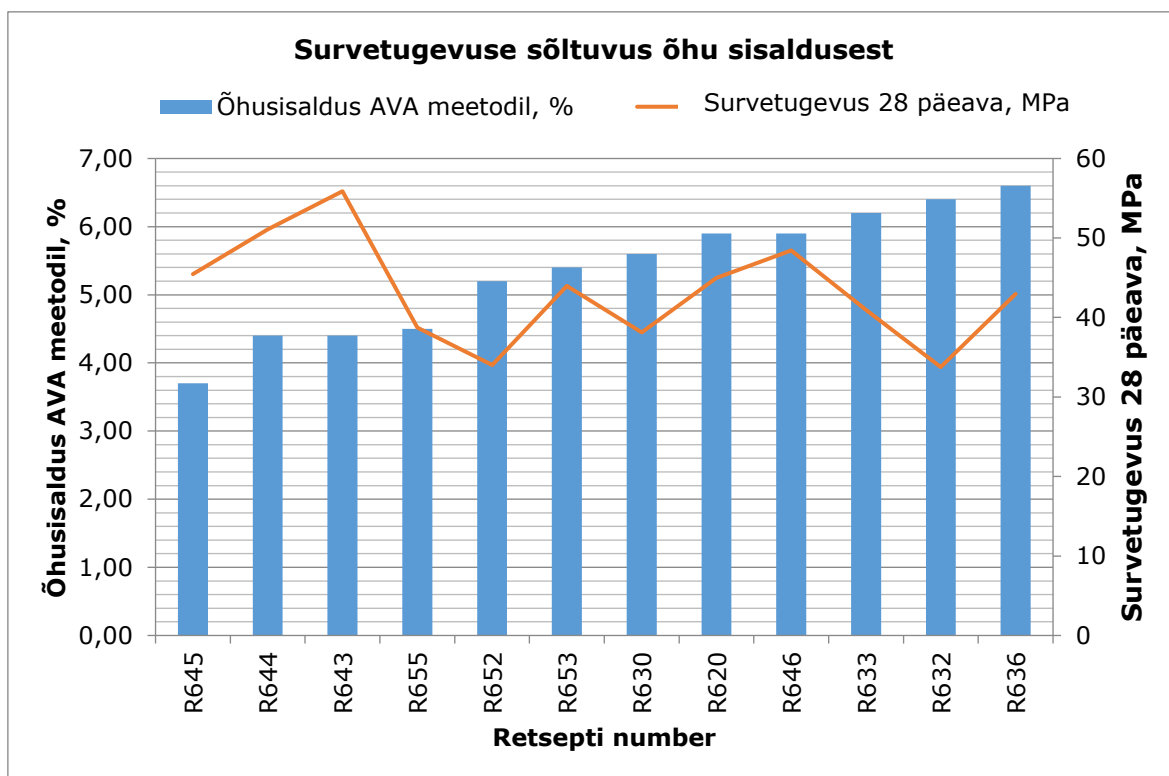
Joonisel 2.29 välja toodud tulemused näitavad, et AVA tulemustel on oluline roll betoonisegude omaduste ennustamisel. Siiski, betoonisegu lõplikud omadused sõltuvad paljudest teguritest, ja ükski üksik muutuja ei saa neid täielikult määratleda. Põhjalikuma analüüsi jaoks võib osutada vajalikuks rakendada keerukamaid statistilisi või masinõppemeetodeid, nagu regressioonanalüüs või masinõppe mudelid, mis suudavad arvestada paljude muutujate koosmõju.



Joonis 2.29 Survetugevuse sõltuvus v/ts suhtest

2.3.12 Survetugevuse sõltuvus õhu sisaldusest

Tugevus suureneb tavaliselt ajas, mistõttu on oodata, et 28-päevase tugevuse väärtused on suuremad kui 7-päevase tugevuse omad. Tugevuse kasv võib varieeruda sõltuvalt retseptist ja kasutatud materjalidest. Vaadeldes retsepti R652, näeme, et 7-päevase tugevuse väärtus on 27,71 MPa ja 28-päevase tugevuse väärtus on 33,95 MPa (vt Joonis 2.30). See näitab tugevuse olulist kasvu aja jooksul, mis on ootuspärane betooni kivinemise protsessi tulemus.



Joonis 2.30 Survetugevuse sõltuvus õhu sisaldusest

Võrdleme retsepte, kus õhusisaldus on erinev. R630 on õhusisaldus rõhumeetodi järgi on 5,6%, 28-päeva kuubiku survetugevus 37,64 MPa. R632 on õhusisaldus rõhumeetodi järgi 6,4%, 28-päeva kuubiku tugevus 33,66 MPa. On näha, retsepti R630 puhul, kus õhusisaldus on väiksem, on 28-päeva kuubiku tugevus suurem kui retsepti R632 puhul. See võib viidata sellele, et madalam õhusisaldus võib soodustada betooni tugevust, samas kui suurem õhusisaldus võib mõjutada negatiivselt betooni tugevust.

On näha, et retseptidel R652, R620 ja R630, mis näitavad suuremat survetugevust, on õhusisaldus suhteliselt madal võrreldes mõne teise retseptiga. See võib viidata sellele, et nendes retseptides võib õhusisalduse vähenemine kaasa aidata survetugevuse suurendamisele. Siiski, teistes retseptides sellist trendi ei ole näha. Põnev on retsepti

R630 tulemus, kus õhusisaldus on üks madalamaid, kuid survetugevus on suhteliselt kõrge. See võib osutada sellele, et teatud komponendid või nende kombinatsioon retseptis aitavad saavutada suuremat survetugevust, hoolimata madalast õhusisaldusest.

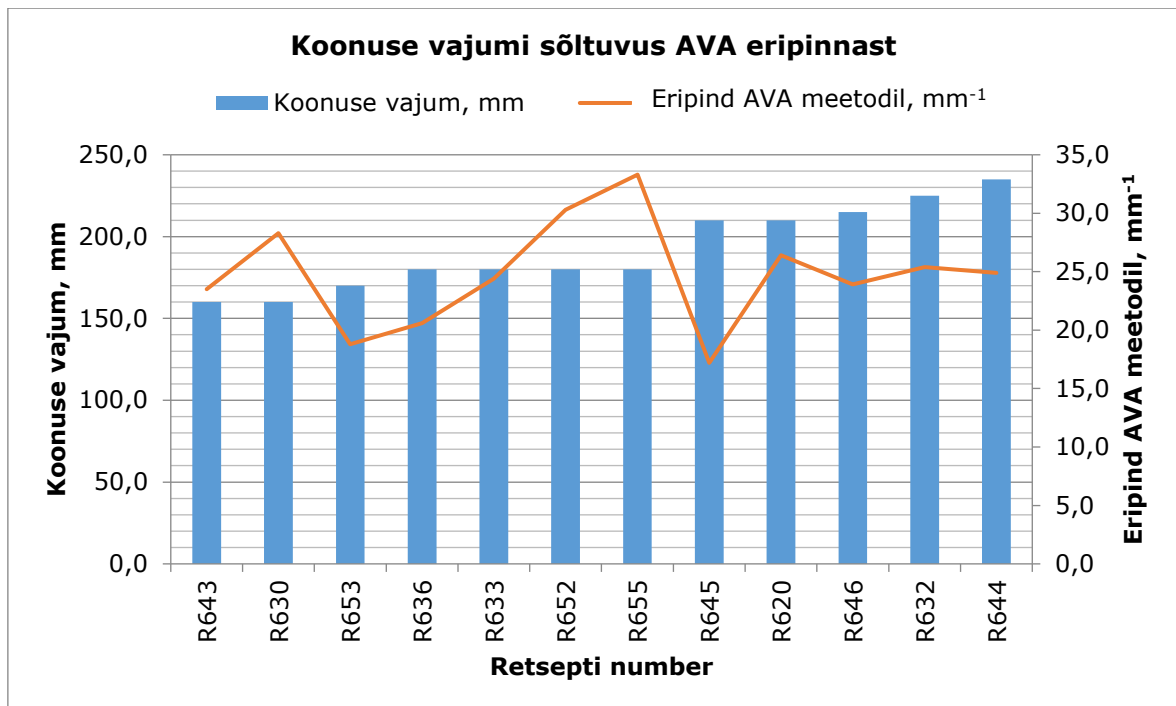
Korrelatsioonikordaja õhusisalduse ja 28 päeva survetugevuse vahel on umbes -0,41, mis näitab mõõdukat negatiivset seost. See tähendab, et suurema õhusisaldusega betoonisegudes on madalam survetugevus 28 päeva möödumisel. Kuigi joonisel 2.30 kujutatu ei tõesta selget põhjuslikku seost. Mõnes retseptis on kõrge õhusisaldusega kaasnenud suurem survetugevus, samas kui teistes retseptides on väiksema õhusisaldusega kaasnenud suurem survetugevus.

Üldiselt näib, et suurema õhusisaldusega retseptid kalduvad näitama väiksemat survetugevust. See trend on kooskõlas betoonitehnoloogia põhiprintsiipidega, kus suurenenud õhumullide sisaldus vähendab betooni tihedust ja seeläbi ka selle survetugevust. Joonisel 2.30 võib leida ka erandeid, kus mõned retseptid, hoolimata suuremast õhusisaldusest, säilitavad suhteliselt kõrge survetugevuse või vastupidi.

Need erandid võivad tuleneda teistest retsepti omadustest, näiteks erilistest lisanditest, mis parandavad betooni omadusi, või kasutatavate materjalide spetsiifilistest omadustest. On märgatav, et survetugevus ja õhusisaldus ei ole alati üheselt seotud. Ehk betooni omadused sõltuvad mitmetest teguritest peale õhusisalduse, sealhulgas tsemendi tüübist, vee ja tsemendi suhtest, täitematerjalide omadustest ja betooni valmistamise ning töötlemise meetoditest.

2.3.13 Betooni konsistendi sõltuvus AVA-st

Joonisel 2.31 on näha, et koonuse vajum (mm) ja tsemendi kogus (kg/m^3) on omavahel seotud. Tavaliselt väheneb koonuse vajum, kui tsemendi kogus suureneb. See võib viidata sellele, et rohkem tsementi sisaldav betoon ei ole nii voolav ja töödeldav.



Joonis 2.31 Koonuse vajumi sõltuvus AVA eripinnast

Võrreldes retsepti R630 ja R632, märkame, et R632 puhul on koonuse vajumine suurem (225,0 mm) kui R630 puhul (160,0 mm), kuigi tsemendi kogus on samal tasemel või isegi veidi väiksem (R630 – 350,0 kg/m³, R632 – 375,0 kg/m³). See võib viidata sellele, et teiste komponentide proportsioonid mõjutavad betooni töödeldavust ja koonuse vajumist rohkem kui tsemendi kogus. R630 ja R632 puhul võib eeldada, et koonuse vajumit on mõjutanud vee kogus, kuna R630 sisaldab 175,0 kg/m³ vett ning R632 sisaldab 188,0 kg/m³ vett.

Siiski ei teki v/ts suhte ja koonuse vajumi vahel lineaarset seost, seega on betooni töödeldavus seotud veel täitematerjalide ja lisandite kogustega. Näiteks R643 ja R644 retseptidel on sarnane v/ts suhe, kuid ühel on suurem koonuse vajum plastifikaatori lisamise tõttu, see näitab, kuidas lisandid võivad parandada töödeldavust. Samuti võivad täitematerjalide kogused põhjustada erinevusi segude töödeldavuses, isegi kui vee ja tsemendi suhe on sama. See toob esile, kui oluline on arvesse võtta kõiki betoonisegu komponente ja nende omavahelisi suhteid, mitte ainult v/ts tegurit, kui soovitakse saavutada teatud omadustega betooni.

2.4 Alternatiivsete meetodite eelised ja väljakutsed

Betooni külmakindlus ei sõltu üksnes AVA katse näitajatest nagu õhumullide kogusest, vaid ka paljudest muudest teguritest, sealhulgas betoonisegu koostisosadest, valamis- ja kõvenemistingimustest ning keskkonnateguritest. Kuigi AVA katse on oluline tööriist õhutühimike süsteemi hindamisel betoonis ja selle potentsiaalse külmakindluse eelhindamisel, tuleks tähelepanu pöörata ka muudele aspektidele ja võimaluse korral teha täiendavaid katseid, et paremini mõista betooni külmakindlust erinevates tingimustes. Seega, betooni külmakindluse tagamiseks on oluline arvestada laiaulatuslike teguritega, mitte ainult keskenduda eripinna mõõtmistele.

Uuringutest [68] on selgunud mõningaid probleeme AVA meetodi kasutamisel. Välja on toodud, et seade võib olla ebatäpne, arvestades rõhumeetodil mõõdetavate andmetega. Lisaks on mainitud, et AVA seadmel puudub võime mõõta väga väikeseid õhumulle, ehk see ei arvesta kõikide võimalike õhumullidega. Viimaseks on mainitud, et seade ei ole sobiv kasutamiseks mitte-õhuga rikastatud betoonisegude korral, kuna liiga väike õhumullide arv segus võis põhjustada ebatäpseid mõõtmisi.

Uuringus [69] juhiti tähelepanu sellele, et betooni pumpamisel suureneb õhumullide vahekaugus ja eripind ning täpsemateks mõõtmisteks oleks vaja katse teha otse objektile peale seda, kui betoon on paigaldatud ja tihendatud. AVA on tundlik masin ning on mõjutatav igasugustest vibratsioonidest. Seega on vajalik, et objektile tehtud mõõdistused oleksid läbi viidud stabiilsel pinnal ning ruumis sees, kuna tuul mõjutab samuti AVA seadet. Nt ehitati Ameerikas selleks spetsiaalne mobiilne uurimislabor, kus saab otse objektile viia läbi AVA katseid. [70] Kokkuvõttes võivad need puudused takistada AVA seadme täpset ja usaldusväärset kasutamist õhumullide omaduste hindamisel. Lõputöö autori soovitus on teha veel katseid, et aru saada, mis on kindlad AVA meetoodika piirid, millal on betoon külmakindel.

AVA kasutamine laboris tagab täpsemad ja usaldusväärsemad tulemused kontrollitud keskkonna tõttu, kuid ei pruugi täpselt simuleerida tegelikke kasutustingimusi. Objektile tehtavad katsed peegeldavad reaalses tingimustes materjali käitumist, kuid võivad olla vähem täpsed ja järjepidevad.

AVA katsega võetakse 200 ml proov betoonist ning EVS 814 standardi järgi katsetatakse pinnakoorumist 150 x 150 x 150 mm katsekehade puhul ning tulemused antakse ühiku kg/m² kohta. Seega läheb katsetatav pind väiksemaks, kui võtta kasutusele alternatiivne meetoodika külmakindluse katsetamiseks. See võib kaasa tuua

katsetulemuste ebakorrektsuse, kuna paigaldatava betooni maht on kordades suurem ning külmakindlust mõjutavad lisaks õhusisaldusele veel mitmed tegurid.

Siiski jõuab uurimustöö autor järeldusele, et AVA kasutamine on vajalik ja kasulik mitmel põhjusel, eriti kvaliteetse betooni tootmisel, mis peab vastu pidama külmumisele ja sulamisele. AVA eelised on järgmised:

1. Reaalajas andmete kogumine: AVA võimaldab reaalajas mõõta õhutühimike jaotust ja parameetreid värskes betoonis. See annab ehitajatele ja inseneridele võimaluse teha kiireid kohandusi betoonisegus, tagades nõutavate õhutühimike parameetrite saavutamise.
2. Täpsus: AVA mõõtmised on väga täpsed, andes selge ülevaate õhutühimike suurusest, jaotusest ja parameetritest. See aitab tagada betooni vastupidavuse külmumisele ja sulamisele;
3. Kasutusmugavus: AVA on disainitud olema kasutajasõbralik, võimaldades lihtsat proovivõttu ja analüüsi. Seadme kasutamine ei nõua ulatuslikku koolitust, muutes selle kättesaadavaks erinevatele kasutajatele.
4. Sästab aega ja ressursse: Traditsioonilised õhutühimike mõõtmise meetodid, nagu mikroskoopiline analüüs, on aeganõudvad ja nõuavad spetsialiseeritud laboriseadmeid. AVA kasutamine võimaldab säästa aega ja vähendada katsete maksumust.
5. Ennetav kvaliteedikontroll: AVA abil saadud teave võimaldab ennetavat kvaliteedikontrolli, identifitseerides potentsiaalsed probleemid enne betooni kõvenemist. See aitab vältida hilisemaid kulukaid parandustöid ja tõstab ehitise üldist kvaliteeti.
6. Dokumenteerimine ja analüüs: AVA tarkvara võimaldab testitulemuste salvestamist ja analüüsimist, luues dokumentatsiooni, mida saab kasutada kvaliteedi tagamiseks ja tulevastes projekti ülevaadetes.

2.4.1 Edasiste uuringute suunad

AVA kasutamine betooni külmakindluse uurimisel pakub mitmeid eeliseid, Hetkel ei ole see meetod Eestis standardiseeritud, kuid uurimustöö autor näeb, et selle meetodi võiks kasutusele võtta. Praegu ei ole seda piisavalt uuritud Eesti kontekstis ning selle metoodika kasutuselevõtu edasiarendamiseks on võimalik välja pakkuda mitu uurimissuunda:

1. Katsete ja võrdluste läbiviimine: Et mõista AVA meetodi täpsust ja usaldusväärsust, on vajalik läbi viia rohkem katseid ja võrdlusi traditsiooniliste

meetoditega, nagu mikroskoopiline analüüs ja külmumis- ja sulamistsüklike testimine. Tuleks läbi viia rohkem välikatseid, et saada täpsem ülevaade betoonisegu külmakindlusest erinevates keskkondades ja tingimustes, mis aitab paremini mõista materjali käitumist pikema aja jooksul. See võimaldab luua suhtearve ja korrelatsioone AVA tulemuste ja traditsiooniliste katsemeetodite vahel, parandades seeläbi AVA meetodi ennustusvõimet ja usaldusväärsust.

2. Temperatuuri mõju uurimine: Kuna temperatuur võib mõjutada õhutühimike käitumist betoonis, on oluline uurida, kuidas erinevad temperatuuritingimused mõjutavad AVA katsetulemusi. See hõlmab nii katsete läbiviimist erinevatel temperatuuridel kui ka AVA meetodi võimekuse hindamist erinevate kliimatingimustega piirkondades.
3. Teiste koostisosade uurimine: Lisaks temperatuurile võivad AVA tulemusi mõjutada ka muud tegurid, nagu betooni koostis, lisandite tüübid ja kogused, segamis- ja valamisprotsess ning keskkonna niiskustase. Uurides laiemat spektrit, saab paremini mõista, kuidas need tegurid mõjutavad AVA tulemusi.
4. Rahvusvaheline kontekst ja kohalikud materjalid: Betooni koostisosad nagu vesi, liiv ja kivimaterjal võivad olenevalt geograafilisest asukohast erineda, mis mõjutab betooni omadusi, sealhulgas selle külmakindlust. Seega on oluline läbi viia katseid AVA meetodil erinevates riikides ja piirkondades, kasutades kohalikke materjale, et mõista, kuidas need erinevused mõjutavad õhutühimike jaotust ja külmakindlust. See aitab luua piirkondlikke juhiseid ja standardeid betooni valmistamiseks, mis on kohandatud kohalike oludega.

AVA meetodi edasiarendamine ja selle rakendamine erinevates kontekstides on oluline samm betooni külmakindluse mõistmisel ja parandamisel. Edasised uurimised selles valdkonnas aitavad kaasa täpsema ja usaldusväärsema meetodi kasutuselevõtu osas betooni kvaliteedi hindamisel, et tagada rajatiste pikemat eluiga ja suuremat vastupidavust ekstreemsetele ilmastikutingimustele.

2.5 Järeldused

Suurem AVA eripind tähendab, et betoonis on rohkem või suuremaid õhumulle, mis on ühtlaselt jaotunud. Manustatud õhk parandab betooni külmakindlust, kuna see pakub ruumi vee laienemiseks külmumisel, vähendades seeläbi sisemisi pingeid ja kahjustuste riski.

1. AVA meetodil mõõdetud õhumullide eripindpind üle 25 mm^{-1} on märkimisväärne indikaator betooni külmakindlusele, pakkudes selget seost väiksema pinnakooremise ja manustatud õhu suurema eripinna vahel. Katsetulemustest selgus, kui õhumullide eripind suureneb 10% võrra, siis külmakindlus suureneb ligikaudu 33,6%.
2. Korrelatsioonikordaja $-0,61$ AVA ning pinnakooremise tulemuste vahel viitab olulisele vastupidisele seosele õhu eripinna suuruse ja pinnakooremise vahel, tõestades argumenti, et väiksemate õhumullide suurendamine betoonis võib oluliselt vähendada külmumisel tekkivat kahju.
3. Katsekehad, mille eripind AVA meetodil on vähemalt 25 mm^{-1} , vastavad külmakindluse kriteeriumile ehk pinnakooremise on väiksem kui $0,2 \text{ kg/m}^2$ pärast 56 tsüklit.
4. Suurem õhumullide eripind, mõõdetuna vähemalt 25 mm^{-1} AVA meetodil, aitab kompenseerida suurema v/ts suhte võimalikke negatiivseid mõjusid, tagades külmakindluse ka suhteliselt suure v/ts suhte juures.
5. Katsemeetodil saadud piisav tsemendi kogus koos mõõdukalt kõrge v/ts teguriga, mis on siiski kompenseeritud suhteliselt suure õhusisaldusega (peegeldub AVA eripinnas), võib säilitada külmakindluse. Kui v/ts suhe tõuseb 10% võrra, siis õhumullide eripind AVA meetodil suureneb protsendiliselt umbes 12,68%.
6. Katsekehad, mille õhumullide eripind AVA meetodil oli vähemalt 25 mm^{-1} , vähenes pinnakooremise umbes 59,3%, võrreldes üldise keskmisega.
7. Kui õhumullide eripind on alla 25 mm^{-1} , siis võib olla betoon külmakindel, kui muud segu omadused (nagu tsemendi kvaliteet ja täitematerjalide valik) on optimeeritud.
8. $0,40 v/ts$ suhte korral tuleb suurendada tsemendi sisaldust betoonisegus selleks, et see kompenseeriks õhu eripinna tulemust alla 25 mm^{-1} .
9. Õhusisalduse mõõtmisel kasutatavate meetodite – rõhumeetodi ja AVA meetodi – vahel esineb märkimisväärsed erinevusi. Keskmise erinevus, kus AVA meetod näitas 9,14% suuremat õhusisaldust võrreldes rõhumeetodiga, toob esile, et erinevad mõõtmistehnikad võivad tuvastada õhumulle erinevalt, mõjutades tulemuste interpretatsiooni. Analüüs näitab, et AVA meetod näitab tavaliselt suuremat õhusisaldust.
10. AVA ja ASTM C457/C457M-16 meetodid on mõlemad väärtuslikud betooni mikrostruktuuriliste omaduste, sealhulgas õhusisalduse, eripinna ja paigutusteguri, hindamiseks. Mõlemad meetodid on võrreldes õhusisalduse mõõtmisel sarnase tundlikkusega, õhusisalduse protsendid erinevad vaid 0,1% piires.

11. Peenliiva puhul iga 1 kg/m^3 suurenemine on seotud keskmiselt $0,062 \text{ mm}^{-1}$ vähenemisega eripinnas. Jämeda liiva puhul iga 1 kg/m^3 suurenemine on seotud keskmiselt $0,0185 \text{ mm}^{-1}$ vähenemisega eripinnas. Graniidi puhul iga 1 kg/m^3 suurenemine on seotud keskmiselt $0,0333 \text{ mm}^{-1}$ vähenemisega eripinnas.
12. Õhku manustava lisandi koguse suurendamine segudes võib positiivselt mõjutada betoonis olevate õhumullide eripinda, mis on oluline külmakindluse ja muude betooni omaduste jaoks. Kui õhku manustava lisandi kogus suureneb 1% võrra, siis AVA meetodil mõõdetud õhumullide eripind suureneb protsendiliselt umbes 15,51%.
13. Kui õhusisaldus suureneb 1%, võib eeldada, et AVA paigutustegur väheneb keskmiselt umbes 0,0322 mm.
14. AVA katsete tulemused näitavad, et eripinna ja 28 päeva vanuse betooni survetugevus negatiivselt korreleerunud (korrelatsioonikoefitsient $-0,45$), mis tähendab, et suurema eripinnaga betoonisegudel on tavaliselt väiksem survetugevus.
15. Paigutusteguri ja survetugevuse vahel on positiivne seos (korrelatsioonikoefitsient $0,45$), mis viitab, et paremini töödeldavad ja kergemini paigutatavad segud võivad viia suurema tugevuse arenguni.
16. Kui AVA meetodil mõõdetud õhumullide eripind suureneb 1% võrra, siis kuubiku tugevus väheneb ligikaudu $0,032 \text{ MPa}$ võrra.

Need järeldused toetavad uurimuse eesmärki ja annavad märku, et AVA meetodil mõõdetud eripinna vähemalt 25 mm^{-1} juuresolekul võib külmakindlus olla tagatud, isegi kui muud seguparameetrid (nagu v/ts suhe või tsemendi kogus) ei ole ideaalsed. Siiski on oluline meeles pidada, et täielikuks mõistmiseks ja kindlate järelduste tegemiseks seostes erinevate seguparameetrite mõjuga betooni külmakindlusele on vajalik põhjalikum analüüs ja võib-olla ka täiendavad katsetused.

KOKKUVÕTE

Uurimistöö keskendus AVA meetoodika efektiivsuse hindamisele betooni külmakindluse mõõtmisel alternatiivse meetodina, võrreldes seda traditsiooniliste lähenemistega. Lähtudes algselt püstitatud eesmärkidest, viidi läbi põhjalik analüüs, käsitledes betooni kestvust, keskkonnaklasse ja külmakahjustusi, uurides mitmekülgset, kuidas erinevad koostisosad – täitematerjalid, tsement, vesitsementtegur, lisandid, ja õhu sisaldus – mõjutavad betooni külmakindlust. Uurimistöö raames rakendati AVA katsete meetodikat ning EVS 814 ja ASTM C457/C457M-16 standardeid järgivaid katseid, et võrrelda nende tulemusi ja mõista õhumullide eripinna rolli betooni külmakindluses.

Uurimistöö praktilises osas viidi läbi katseid, kasutades 12 erinevat betoonisegu, millest igaühe puhul valmistati kaks katsekeha standardi EVS 814 järgi. Lisaks valmistati kaks katsekeha vastavalt ASTM C457/C457M-16 standardile, et koguda lisaandmeid ja võrrelda erinevaid meetodeid. Iga katsekeha valmistamisel teostati katsed AVA masinaga, eesmärgiga võrrelda AVA meetodi tulemusi traditsiooniliste külmakindluse hindamise meetoditega. Selline lähenemine võimaldas mitte ainult testida AVA meetodi efektiivsust, vaid ka pakkuda soovitusi betooni külmakindluse hindamise meetodite parandamiseks.

Katsete peamine eesmärk oli uurida ja võrrelda pinnakooremise ning AVA katsete tulemusi, keskendudes eriti v/ts suhte ning õhu sisalduse mõjule betooni külmakindlusele. Katsekehi valmistati muutes v/ts suhet ja õhu sisaldust lisandite ning täitematerjalide abil, et teha kindlaks, kas suurem õhu eripind suudab kompenseerida suuremat v/ts suhet või väiksemat tsemendi kogust. Katsetes kasutati XF4 klassi betooni. Uurimuse käigus püüti tuvastada, kas AVA masinaga mõõdetud õhumullide eripind vähemalt 25 mm^{-1} tagab alati betooni külmakindluse ning see küsimus leidis ka kinnitust.

Uurimistöö käigus leidis veel kinnitust hüpotees, et suurem õhu eripind suudab kompenseerida suuremat v/ts suhet või väiksemat tsemendi kogust, säilitades külmakindluse. Kui v/ts suhe tõuseb 10% võrra, siis õhumullide eripind AVA meetodil suureneb protsendiliselt umbes 12,68%. Tulemused näitasid, et AVA meetoodika korrelatsioonikoefitsient pinnakooremisega oli $-0,61$, mis tõestab suurema õhu eripinna positiivset mõju betooni külmakindlusele. Leiti, et kui õhumullide eripind suureneb 10% võrra, kasvab betooni külmakindlus hinnanguliselt 33,6% võrra. Lisaks leiti, et AVA meetodi abil mõõdetud õhusisaldus oli keskmiselt 9,14% suurem võrreldes rõhumeetodi abil saadud tulemustega, kusjuures standardhälve oli 12,82%, mis viitab

märkimisväärsele varieeruvusele erinevate retseptide vahel. Vaadeldes õhusisalduse protsente, mis saadi kasutades AVA ja ASTM C457/C457M-16 meetodeid, olid tulemused üksteisele väga lähedal, erinevus vaid 0,1% piires, näidates mõlema meetodi sarnast tundlikkust õhusisalduse mõõtmisel.

Välikatsete käigus kinnitati, et betoonisegu on külmakindel, millele viitavad AVA eripinna tulemused $41,7 \text{ mm}^{-1}$ vahetult pärast betoonivalu ja $32,3 \text{ mm}^{-1}$ pärast 60 minutit ning pinnakooremise meetodi keskmine tulemus $0,07 \text{ kg/m}^2$. Autor soovib edasistel uurimistel teha lisaks laborikatsetele ka välikatseid, et saada realistlikumad tulemused.

Uurimistöö kinnitas AVA meetodika mitmeid eeliseid, sealhulgas reaajas andmete kogumist, täpsust ja kasutusmugavust, mis võimaldavad kiireid kohandusi betoonisegu koostises. Selline lähenemine aitab oluliselt parandada betoonkonstruktsioonide kvaliteeti, tagades nende pikema eluea ja vastupidavuse ekstreemsetes ilmastikutingimustes. Tuleviku uurimissuunad peaksid keskenduma AVA meetodika täpsuse ja usaldusväärsuse edasisele testimisele, näiteks temperatuuri mõju uurimisele, õhutühimike käitumisele ning rahvusvahelise konteksti ja kohalike materjalide mõju analüüsile.

Uurimustöö tulemuste hindamine näitab, et AVA meetodika kasutamine betooni külmakindluse uurimisel pakub mitmeid olulisi eeliseid, ehkki see pole veel Eestis standardiseeritud. Uurimustöö autor rõhutab vajadust AVA meetodi edasiarendamiseks, standardiseerimiseks ja laialdasemaks kasutuselevõtuks, eriti arvestades, et hetkel ei ole see Eesti kontekstis piisavalt uuritud. AVA meetodi potentsiaalne kasutuselevõtt Eestis võib kaasa tuua olulise edasimineku betooni külmakindluse hindamisel, pakkudes täpsemat ja usaldusväärsemat analüüsi võrreldes traditsiooniliste meetoditega.

Kokkuvõttes kinnitab uurimistöö AVA meetodika olulist potentsiaali betooni külmakindluse hindamisel, pakkudes väärtuslikku panust selles valdkonnas tehtavasse uurimistöösse. Edasine uurimine ja arendamine võivad viia selle meetodika standardiseerimise ja laialdase kasutuselevõtuni, mis omakorda aitab kaasa ehitismaterjalide kvaliteedi tõusule ja ehitiste kestvusele.

SUMMARY

The research focused on evaluating the effectiveness of the AVA methodology for measuring the frost resistance of concrete as an alternative method, comparing it to traditional approaches. Initially set objectives guided a comprehensive analysis, addressing concrete durability, environmental classes, and frost damage, extensively exploring how different components — aggregates, cement, water-cement ratio, additives, and air content — affect concrete frost resistance. The AVA test methodology was applied within the research, along with tests following the EVS 814 and ASTM C457/C457M-16 standards, to compare results and understand the role of air void specific surface in concrete frost resistance.

In the practical part of the research, tests were conducted using 12 different concrete mixes, with two specimens prepared for each mix according to the EVS 814 standard. Additionally, two specimens were made according to the ASTM C457/C457M-16 standard to gather additional data and compare different methods. Each specimen's preparation involved testing with the AVA machine, aiming to compare AVA method results with traditional frost resistance assessment methods. This approach tested the AVA method's effectiveness and provided recommendations for improving concrete frost resistance assessment methods.

The main objective of the tests was to investigate and compare the results of surface scaling and AVA tests, focusing particularly on the influence of the water-cement ratio and air content on concrete frost resistance. Specimens were prepared by varying the water-cement ratio and air content using additives and aggregates to determine if a higher specific surface of air can compensate for a higher water-cement ratio or a lesser amount of cement. The tests used concrete of XF4 class. The research sought to establish whether the specific surface of air bubbles measured by the AVA machine, at least 25mm^{-1} , always ensures concrete frost resistance, which was confirmed.

The research further confirmed the hypothesis that a higher air void specific surface indeed compensates for a higher water-cement ratio or a smaller amount of cement, maintaining frost resistance. When the water-cement ratio increased by 10%, the air void specific surface measured by the AVA method increased by approximately 12,68%. The results showed that the correlation coefficient of the AVA methodology with surface scaling was -0,61, proving the positive impact of a higher specific surface of air on concrete frost resistance. It was found that if the specific surface of air voids increased by 10%, the frost resistance of concrete increased by an estimated 33,6%. Additionally,

the air content measured by the AVA method was found to be, on average, 9,14% higher than that obtained by the pressure method, with a standard deviation of 12,82%, indicating significant variability between different mixes. Observing the percentages of air content obtained using both AVA and ASTM C457/C457M-16 methods, the results were very close to each other, with a difference of only 0.1%, demonstrating similar sensitivity in measuring air content by both methods.

Field tests confirmed that the concrete mix was frost-resistant, as indicated by the AVA specific surface results of 41,7 mm⁻¹ immediately after concrete pouring and 32,3 mm⁻¹ after 60 minutes, and an average result of the surface scaling method of 0,07 kg/m². These findings not only confirm the potential of the AVA methodology for more accurate assessment of concrete frost resistance but also emphasize the need for its broader investigation and potential standardization.

The research demonstrated several advantages of the AVA methodology, including real-time data collection, accuracy, and ease of use, allowing quick adjustments in the concrete mix composition. Such an approach significantly improves the quality of concrete constructions, ensuring their longer lifespan and durability under extreme weather conditions. Future research directions should focus on further testing the accuracy and reliability of the AVA methodology, such as investigating the impact of temperature on air void behavior and analyzing the influence of the international context and local materials.

The evaluation of the research results shows that using the AVA methodology for investigating concrete frost resistance offers several significant advantages, although it has not yet been standardized in Estonia. The author of the research emphasizes the need for further development, standardization, and broader adoption of the AVA method, particularly considering that it is currently under-researched in the Estonian context. The potential adoption of the AVA method in Estonia could lead to significant advancements in assessing concrete frost resistance, offering more accurate and reliable analysis compared to traditional methods.

In conclusion, the research confirms the significant potential of the AVA methodology in assessing concrete frost resistance, providing valuable contributions to research in this field. Further investigation and development could lead to the standardization and widespread adoption of this methodology, which in turn would contribute to the improvement of construction material quality and the durability of structures.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Transpordiamet, "Teetööde tehnilised kirjeldused." Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://transpordiamet.ee/riigiteede-juhendid#teetoode-tehnilised->
- [2] Eesti Standardikeskus, "EVS 814:2020." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-814-2020>
- [3] Transpordiamet, "Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri." [Online]. Available: <https://transpordiamet.ee/media/2727/download>
- [4] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 12350-7:2019." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12350-7-2019>
- [5] "Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0457_c0457m-16.html
- [6] M. Pigeon, *Durability of Concrete in Cold Climates*. CRC Press, 2014.
- [7] L.-M. Raado, *Korrosioonikaitse ehituses*. Karl Õigeri Stipendiumifond, 2022. Accessed: Apr. 06, 2024. [Online]. Available: <https://ehituskeskus.ee/raamatud/korrosioonikaitse-ehituses/>
- [8] "Teedeehituslik betoon kasutuseaga 100 aastat ja rohkem lõpparuanne (v.1.1)." Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <http://www.digar.ee/id/et/nlib-digar:668076>
- [9] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 1990:2002." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1990-2002>
- [10] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 206:2014+A2:2021." Accessed: Feb. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-206-2014-a2-2021-consolidated>
- [11] T. Laur, L.-M. Raado, and V. Kikas, "Tsemendi sulfaadikindlus - betooni püsivuse üks eeltingimusi".
- [12] "Kliimanormid," Keskkonnaagentuur | ILM. Accessed: Feb. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/>

- [13] "Elastsete teekatendite projekteerimise juhend." [Online]. Available: <https://transpordiamet.ee/media/2769/download>
- [14] "Proovivõtu tehnoloogia mõju betooni survetugevusele ja külmaskindlusele."
- [15] "Betooni klass, selle mõiste ja määramine." Accessed: Nov. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.betoon.org/wp-content/themes/betoon/pdf/EH00_9.pdf
- [16] H. Matve, *Eesti sillaehitus*. 2004.
- [17] D. Nagrockiene, G. Skripkiunas, and G. Girskas, "Predicting Frost Resistance of Concrete with Different Coarse Aggregate Concentration by Porosity Parameters," *Mater. Sci.*, vol. 17, Jul. 2011, doi: 10.5755/j01.ms.17.2.493.
- [18] S. Ahmari and L. Zhang, "The properties and durability of alkali-activated masonry units," in *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, F. Pacheco-Torgal, J. A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, and P. Chindapasirt, Eds., Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 643–660. doi: 10.1533/9781782422884.4.643.
- [19] E. Uustalu, *Betoonilisandid*. Tallinn: Ajaleht "Maaleht," 1997.
- [20] M. A. Abed, G. L. Balázs, M. A. Abed, and G. L. Balázs, "Concrete Performance in Cold Regions: Understanding Concrete's Resistance to Freezing/Thawing Cycles," in *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*, IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.99968.
- [21] G. Fagerlund, "Destruction mechanisms. Concrete technology. Test methods. Quality control," 1995.
- [22] T. F. Rønning, "Freeze-Thaw Resistance of Concrete Effect of: Curing Conditions, Moisture Exchange and Materials," *Anno*, no. 6354, 2001.
- [23] Julia, "What is the Freeze-Thaw Cycle in Concrete?," Polytrade. Accessed: Feb. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.polytrade.com.br/what-is-the-freeze-thaw-cycle-in-concrete/>
- [24] "Õhku sisseeviivate betoonilisandite kasutamine betooni püsivuse tõstmiseks.pdf." Accessed: Nov. 21, 2023. [Online]. Available: https://www.kunda.heidelbergmaterials.ee/sites/default/files/assets/document/ohku_sisseeviivate_betoonilisandite_kasutamine_betooni_pusivuse_tostmiseks.pdf

- [25] D. Bentz and P. Aitcin, "The Hidden Meaning of Water-Cement Ratio," *Concr. Int.*, vol. 30, pp. 51–54, Jan. 2008.
- [26] R. Treier, "Peentäitematerjali terastikulise koostise mõju betooni külmakindlusele," TalTech, Tallinn, 2017. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/1f357b13-af48-4ed7-a13e-598b79a9ae22>
- [27] "(Raud)betoonkonstruktsioonide üldkursus I."
- [28] L.-M. Raado, *Ehitusmaterjalid*. Sihtasutus Karl Õigeri, 2018. Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://ehituskeskus.ee/raamatud/ehitusmaterjalid/>
- [29] Z. Rusin and P. Świercz, "Frost resistance of rock materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 704–714, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.198.
- [30] A. Saad, S. Guédon, and F. Martineau, "Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze–thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters," *Comptes Rendus Geosci.*, vol. 342, no. 3, pp. 197–203, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.crte.2009.12.009.
- [31] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 1097-6:2022." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1097-6-2022>
- [32] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 12620:2005+A1:2008." Accessed: Apr. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12620-2005-a1-2008-consolidated>
- [33] Maanteeamet, P. Vilba, and S. Sillamäe, "Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses." 2011.
- [34] "Täiteainetemõju betooni külmakindlusele ja survetugevusele." Accessed: Nov. 20, 2023. [Online]. Available: https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/4315/Sergei_Nazarenko_EH_mag_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [35] A. M. Neville, *Properties of Concrete*. Pearson, 2011.
- [36] P. A. Advincula *et al.*, "Replacement of Concrete Aggregates with Coal-Derived Flash Graphene," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, no. 1, pp. 1474–1481, Jan. 2024, doi: 10.1021/acsami.3c15156.

- [37] W. Schulze, *Der Baustoff Beton und seine Technologie*. Verlag für Bauwesen, 1967.
- [38] P. Boos and Z. Giergiczny, "Testing frost resistance of concrete with different cement types - experience from laboratory and practice," 2010.
- [39] E. Liisma, "Kas betooni külmakindluse hindamine Eestis vajab alternatiivmeetodit?," *Ehitaja*, 2011, [Online]. Available: <https://ws.lib.ttu.ee/publikatsioonid/et/publ/item/712fa620-1a37-43fc-a414-854966766c6b>
- [40] "Control of air content in concrete." Accessed: Nov. 21, 2023. [Online]. Available: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_258.pdf
- [41] "AVA-3000-TDS-data-sheet-Germann-Instruments.pdf." Accessed: Nov. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2021/12/AVA-3000-TDS-data-sheet-Germann-Instruments.pdf>
- [42] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 934-2:2009+A1:2012." Accessed: Apr. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-934-2-2009-a1-2012-consolidated>
- [43] K. Hover, "Why is there air in concrete?," #C930011, 1993.
- [44] B. Łażniewska-Piekarczyk, "The frost resistance versus air voids parameters of high performance self compacting concrete modified by non-air-entrained admixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 1209–1220, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.080.
- [45] "AVA Fact Sheet.pdf." Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://aii.transportation.org/Documents/AVAFactSheet.pdf>
- [46] "BÜ2 2017 Batoon ja Raudbatoon. Spetsifitseerimine, tehnoloogia, kvaliteet, vastavushindamine," ET Infokeskus. Accessed: Dec. 13, 2023. [Online]. Available: <https://ehituskeskus.ee/raamatud/bu2-2017-batoon-ja-raudbatoon-spetsifitseerimine-tehnoloogia-kvaliteet-vastavushindamine/>
- [47] E. Uustalu, "Talvine betoneerimine," *Ehitaja*, 2000. Accessed: Nov. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.batoon.org/wp-content/themes/batoon/pdf/EH00_11_001.pdf

- [48] E. Uustalu, "Betooni paigaldusjärgsest hooldusest," *Ehitaja*, 2000. Accessed: Nov. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.betoon.org/wp-content/uploads/2012/12/EH2000_12.pdf
- [49] E. Uustalu, "Betoneerimine kuuma ilmaga," *Ehitaja*, 2002. Accessed: Nov. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.betoon.org/wp-content/uploads/2012/12/EH2002_6.pdf
- [50] J. M. Macía, "Design of concrete bridges for sustainability and durability," McGill University, Montréal, Canada, 2011.
- [51] U. Starossek, "Concrete Bridges. Von Paul E. Mondorf," *Beton- Stahlbetonbau - BETON- STAHLBETONBAU*, vol. 103, pp. 712–712, Oct. 2008, doi: 10.1002/best.200890107.
- [52] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 1504-3:2006." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1504-3-2006>
- [53] W. Caiyun, W. Li, C. Zhang, and F. Jinpeng, "Effect of Protective Coatings on Frost Resistance of Concrete Structures in Northeast Coastal Areas," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 678, no. 1, p. 012108, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/678/1/012108.
- [54] N. De Belie *et al.*, "A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 5, no. 17, p. 1800074, Sep. 2018, doi: 10.1002/admi.201800074.
- [55] Z. Bonić, G. T. Čurčić, M. Trivunić, N. Davidović, and N. Vatin, "Some Methods of Protection of Concrete and Reinforcement of Reinforced-Concrete Foundations exposed to Environmental Impacts," *Procedia Eng.*, vol. 117, pp. 419–430, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.189.
- [56] J. Fang, L. Zhao, and J. Shi, "Frost Resistance and Pore Structure of Concrete Incorporated with Rubber Aggregates and Nano-SiO₂," *Materials*, vol. 14, no. 5, p. 1170, Mar. 2021, doi: 10.3390/ma14051170.
- [57] S. Õunloo, "Betoonis kasutatavate hüdrofobiseerivate lisaainete toime," Tallinna Tehnikakõrgkool, 2015. Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://dSPACE.tkTK.ee/handle/20.500.12863/1199>
- [58] G. Valle, "Is Concrete Waterproof?," Your Own Architect. Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.yourownarchitect.com/is-concrete-waterproof/>

- [59] "mbs-astm-c666_06_24_2020.pdf." Accessed: Nov. 13, 2023. [Online]. Available: https://assets.master-builders-solutions.com/en-us/mbs-astm-c666_06_24_2020.pdf
- [60] "GOST 10060.4-95." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://runorm.com/catalog/50/670403/>
- [61] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 480-11:2005." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-480-11-2005>
- [62] "by 72 Betonin laadunvarmistus osa 1 - Betonin ilmahuokosparametri määritys ohuthiestä by betoniyhdistys." Jan. 28, 2021. Accessed: Mar. 16, 2024. [Online]. Available: https://issuu.com/betoniyhdistys/docs/by72_betonin_laadunvarmistus_osa1_julkaisuv_ersio_2
- [63] T. Ojala, Y. Chen, J. Punkki, and F. Al-Neshawy, "Characteristics of Entrained Air Voids in Hardened Concrete with the Method of Digital Image Analysis Coupled with Schwartz-Saltykov Conversion," *Materials*, vol. 14, no. 9, p. 2439, May 2021, doi: 10.3390/ma14092439.
- [64] J. Wojakowski, G. Crawford, C. Peterson, and G. Instruments, "Introducing the Air Void Analyzer (AVA)." Construction Technology Laboratories, Inc.
- [65] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 12350-2:2009." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12350-2-2009>
- [66] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 12390-1:2012." Accessed: Feb. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12390-1-2012>
- [67] Eesti Standardikeskus, "EVS-EN 12390-2:2009." Accessed: Feb. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-12390-2-2009>
- [68] B. Łażniewska-Piekarczyk, "Examining the possibility to estimate the influence of admixtures on pore structure of self-compacting concrete using the air void analyzer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 374–387, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.100.
- [69] S. Trost, "Measuring Air Void Characteristics of Oklahoma Air Entrained Concrete using the Air Void Analyzer (AVA) / Analyzing AVA Sources of Error." Steve Trost, Ph.D., P.E. Director, R&D, Jan. 2009. [Online]. Available: https://www.academia.edu/106498999/Measuring_Air_Void_Characteristics_of_Oklah

oma_Air_Entrained_Concrete_using_the_Air_Void_Analyzer_AVA_Analyzing_AVA_Sou
rces_of_Error?uc-sb-sw=74302870

[70] M. Anderson-Wilk, "Using the air void analyzer for real-time quality control adjustments in the field." Iowa State University, 2004. [Online]. Available: <https://publications.iowa.gov/2943/1/AVAtch.pdf>

Lisa 1 – AVA tulemuste väljavõte

Air Void Analyzer AVA-3000 Type Company name

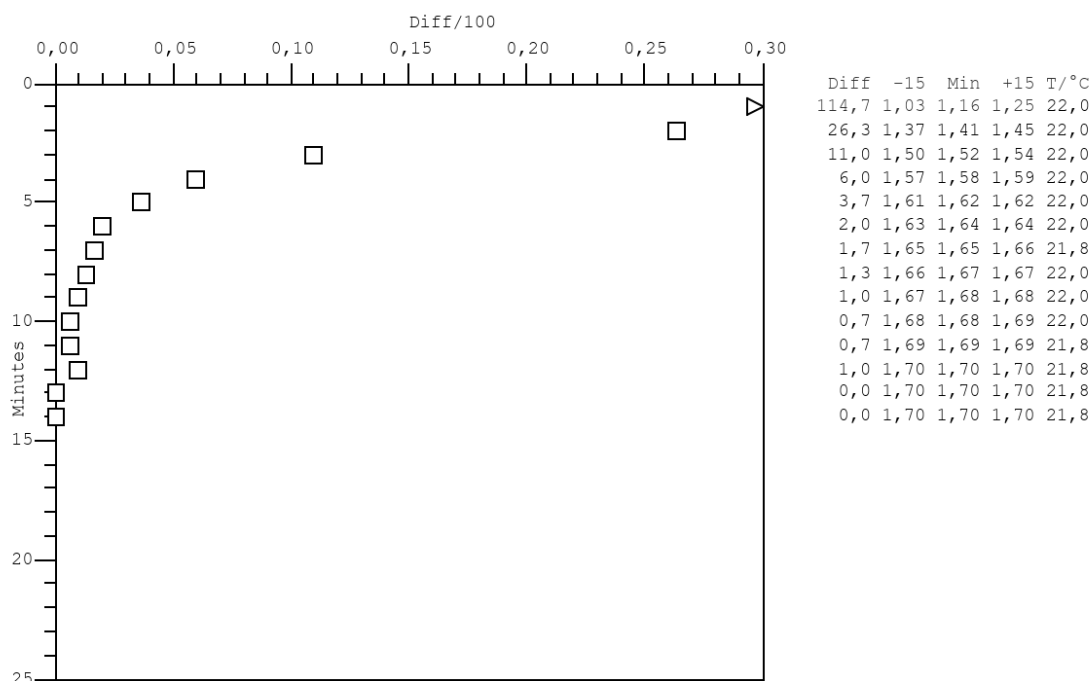


Measurement of 23.11.2023 9:42

Sampler	: JANE-LY TAMMEKIVI	Mortar<6mm	: 68.9 %
Ordered by	: TALTECH	Expected air	: 5.0 %
Sample location	: REMEI BALTICA OÜ	Paste	: 31.04 %
Case number	: 22.11.2023.R653.1	Sample volume	: 20.0 cm3
Sample number	: 2		

Analysis

Start: 0.0g +5sec.: 0.16g +30sec.: 0.79g Temp: 21,6°C



Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length	: < 2mm	< 1mm	< 0.35mm
Air-% concrete	: 6,0 %	5,4 %	3,0 %
Air-% paste	: 19,5 %	17,4 %	9,8 %
Air-% putty	: 16,3 %	14,8 %	8,2 %
Specific surface	: 17,2 mm ⁻¹	18,8 mm ⁻¹	
Spacing factor	: 0,274 mm	0,263 mm	

Comments

> õhk 5,0%
> 400kg, V/T 0,45

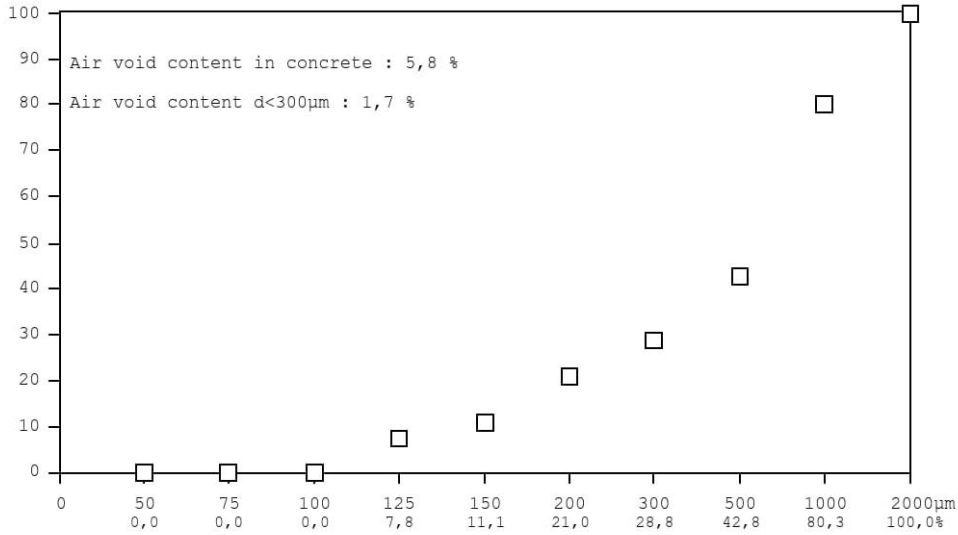
Sign.: _____



Measurement of 23.11.2023 9:42

Case number : 22.11.2023.R653.1
 Sample number : 2

Distribution of air void content for voids < 2 mm (%)



Distribution of air void content in cement paste for voids < 2 mm (%)

