



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

HOOLDUSE JA PINNATÖÖTLUSE MÕJU BETOONI TÖÖVUUKIDE PAINDETÕMBETUGEVUSELE

EFFECTS OF CURING AND SURFACE TREATMENT ON THE FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE JOINTS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mark Henrik Vorobjov

Üliõpilaskood: 177610

Juhendaja: Mattias Põldaru

Tallinn 2024

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.

"....." mai 2024

Autor:

.....
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"....." mai 2024

Juhendaja:

.....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....". mai 2024

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Mark Henrik Vorobjov**,

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

TÖÖVUUKIDE HOOLDUSE JA PINNATÖÖTLUSE MÕJU BETOONI PAINDETÕMBETUGEVUSELE,

mille juhendaja on Mattias Põldaru

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.

.... mai 2024

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **MARK HENRIK VOROBJOV**Üliõpilaskood **177610**Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**Peeriala: **Ehitusjuhtimine**

Lõputöö teema:

**HOOLDUSE JA PINNATÖÖTLUSE MÕJU BETOONI TÖÖVUUKIDE
PAINDETÕMBETUGEVUSELE****EFFECTS OF CURING AND SURFACE TREATMENT ON THE FLEXURAL
STRENGTH OF CONCRETE JOINTS**Juhendaja: **Mattias Põldaru**

mattias.poldaru@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja
Perekonnanimi

Kontakt (e-post või telefon)

Allkiri ja kuupäev

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida pinnatöötamise mõju betooni töövuugi paindetõmbetugevusele
2. Hinnata valamisviivituse ja kivistumistingimuste mõju betooni töövuugi paindetõmbetugevusele

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Katsekehade valmistamine	03.04.2024
2. Katsekehade katsetamine	30.04.2024
3. Katsetulemuste töötlus ja analüüs	08.05.2024
4. Lõputöö kaitsmiseelne ülevaatus (90%)	08.05.2024
5. Lõputöö esitamine	20.05.2024

Lõputööde ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

08.05.2024

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

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

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

Kirjeldus	Tähtaeg
1 Katsetuste planeerimine	05.12.2023
2 Kirjanduse ülevaade	08.05.2024
3 Katsete teostamine	08.05.2024
4 Katsetulemuste analüüs ja järeldused	08.05.2024

Lõputöö esitamise tähtaeg:

20. mai 2024

Plagiaadikontrolli läbinud lõputöö digiallkirjastatakse autori, juhendaja ja kaitsmiskomisjoni esimehe poolt. Paberil pole vaja allkirju koguda.

Lõputöö ülesanne välja antud: 24.11.2023

Juhendaja: **Mattias Põldaru**

Ülesande vastu võtnud: **Mark Henrik Vorojov**

Avalikustamise piirangu tingimused: puuduvad

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON	2
LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS.....	3
SISUKORD	7
SISSEJUHATUS.....	9
1. Töövuugid betoonkonstruktsioonides.....	10
1.1.1 Nõuded betooni töövuukidele ja peamised vead ehitusplatsil.....	10
1.1.2 Betooni koostis	11
1.1.3 Betooni paigaldamine ja järelhoolduse tingimused ehitusplatsil	11
1.2 Paindetõmbetugevust mõjutavad tegurid	12
1.2.1 Paindetõmbetugevuse olemus	12
1.2.2 Kolme-punkti ja nelja-punkti paindetõmbetugevuse katse erinevus	13
1.2.3 Survetugevuse mõju paindetõmbetugevusele	14
1.2.4 Vesitsementteguri mõju betooni paindetõmbetugevusele	16
1.2.5 Täitematerjali mõju paindetõmbetugevusele.....	18
1.2.6 Lisandite mõju paindetõmbetugevusele.....	20
1.3 Betooni kivistumistingimuste mõju paindetõmbetugevusele.....	22
1.3.1 Betooni kivistumisaja mõju paindetõmbetugevusele.....	22
1.3.2 Temperatuuritingimuste mõju paindetõmbetugevusele.....	23
2. Katsemetoodika.....	26
2.1 Katseplaan.....	26
2.2 Betoonisegudes kasutatud materjal.....	27
2.3 Katsetes kasutatud betoon	27
2.4 Katsemeetodid	29
2.4.1 Raketiste valmistamine.....	31
2.4.2 Katsekehade betoonivalu.....	32
2.4.3 Katsekehade vormidest vabastamine ja hoiustamine	35
2.4.4 Betooni tiheduse määramine.....	36
2.4.5 Betooni survetugevuse määramine kuubikukujulistel katsekehadel.....	37
2.4.6 Betooni paindetõmbetugevuse määramine	39
2.5 Katsetulemuste analüüs	43
2.5.1 4-tunnine valamisviivitus	45
2.5.2 18-tunnine valamisviivitus	48

2.5.3	7-päevane valamisviivitus	49
2.5.4	Erinev pinnatöötlus	51
2.5.5	Erinev valamisviivitus 20 °C keskkonnas, kaetud	54
2.5.6	Erineva valamisviivitusega 20 °C keskkonnas.....	56
2.5.7	Erineva valamisviivitusega 60 °C keskkonnas.....	57
2.5.8	Erineva betoonisegu mõju paindetõmbetugevusele	58
2.5.9	Valamisviivituse ja niisutamise mõju paindetõmbetugevusele 60 °C keskkonnas	60
2.5.10	Valamisviivituse ja niisutamise mõju paindetõmbetugevusele 20 °C keskkonnas	62
2.5.11	Survetugevuse mõju katsekehade paindetõmbetugevusele	64
2.6	Soovitusi järgnevateks uurimistöödeks.....	66
3.	Järeldused.....	68
	KOKKUVÕTE.....	71
	SUMMARY	72
	KASUTATUD KIRJANDUS	74
	Lisa 1.	76

SISSEJUHATUS

Töö eesmärk on uurida pinnatöötuse mõju betooni töövuugi paindetõmbetugevusele ja hinnata valamisviivituse ja kivistumistingimuste mõju betooni töövuugi paindetõmbetugevusele.

Uurimisteema olulisuse tingib see, et Eestis on üheks enamlevinud ehitusmaterjaliks betoon. Betooni kasutatakse nii hoonete, rajatiste kui ka teede ehituses. Seega on töövuukide kasutamine tihti vältimatu. Betooni kasutamisel esineb mitmesuguseid väljakutseid ja riske. Need on tingitud nii keskkonnast, täitematerjali kvaliteedist kui ka inimlikust eksimusest. Betooni koostis varieerub vastavalt betooni kasutustingimustele ja keskkonnale.

Antud magistritöös võrreldi betooni erineva hooldamise ja pinnatöötuse mõju töövuukide paindetõmbetugevusele. Lisaks võrreldi valamisviivituse mõju paindetõmbetugevusele. Paindetõmbetugevuse määramiseks valmistati hulk katsekehasid, mis katsetati pärast raketiste eemaldamist ja kivistumist. Katsekehade katsetamise meetodika tuleb viia mingi tingimuse põhjal samale alusele, et tulemused oleks võrreldavad. Seetõttu võimalusel kasutame betooni katsetamiseks standardikohaseid katsemeetodeid.

Magistritöö eesmärk on uurida töövuukide hoolduse ja pinnatöötuse mõju betooni paindetõmbetugevusele sõltuvalt järgmistest tingimustest: erinev töövuugi pinnatöötlus, erinev töövuugi hooldus, erinev betoonivalu viivitus, erinev kivistumistingimus, erinev betoonisegu retsept.

Võtmesõnad: betooni töövuuk, töövuukide hooldus, töövuukide pinnatöötlus, betooni paindetõmbetugevus, magistritöö.

1. TÖÖVUUGID BETOONKONSTRUKTSIOONIDES

1.1.1 Nõuded betooni töövuukidele ja peamised vead ehitusplatsil

Standard EVS-EN 13670:2010 näeb ette, et töövuugid ei tohi paikneda kriitilistes asukohtades. Raketistes ei tohi enne betooni valamist olla prahti, lund, jääd ega seisvat vett. Kui valu käigus on või peaks tekkima oht, et vihm või mu voolav vesi võib tsemendi ja peenosised betoonisegust välja uhtuda, siis tuleb kasutusele võtta abinõud selle vältimiseks. Kui betooni valatakse varem betoonitud konstruktsiooniosadele, tuleb jälgida, et madal temperatuur ei põhjustaks paigaldatava betooni külmumist enne, kui betoon on saavutanud piisava tugevuse külmumise talumiseks. [1]

Juba varem betoonitud konstruktsiooni jätkamisel tuleb enne vuugi tegemist vana pinda pesta, puhastada ja katta värske betooniga. Pärast seda tuleb ühtlaselt jätkata betooni valamisele. Kui vuuk ei ole heas seisukorras, siis võib see põhjustada niiskuse läbitungimist, mille tulemusena ei ole konstruktsioon piisavalt tugev. [2]

Üks betooni paigaldamise põhivigadest on aluspinna ebapiisav ettevalmistus. Betooni pinna ettevalmistamiseks tuleb raketisest eemaldada praht, tolm ja muu, mis ei tohiks sattuda betoonisegu sisse. Hiljem võib see põhjustada pragusid ja kahjustada konstruktsiooni terviklikkust. Stabiilse ja kauakestva betoonpinna jaoks on oluline teha korralik ettevalmistus. [3]

Kivinemine on protsess, mille käigus on vajalik säilitada betoonis kivistumist võimaldav veesisaldus. Kui eiratakse kivinemiseks vajalikku hooldust, siis võib see põhjustada betooni poorsuse suurenemist, tugevuse vähenemist ja pragunemist. Selle vältimiseks tuleks katta betoon vee aurustumise vältimiseks, hoida väljakuivamist takistavat kõrget õhuniiskust, niisutada betoonipinda või kasutada betoonisegus väljakuivamist takistavaid lisandeid. [4]

Betoon paisub ja tõmbub kokku tingituna mahukahanemisest, väljakuivamisest ja temperatuuri kõikumistest. Seega tuleb olla tähelepanelik deformatsioonivuukidega - neid hooletusse jättes võivad tekkida praod. Õigesti paigutatud deformatsioonivuugid võimaldavad kontrollitud liikumist ja seega vähendavad kontrollimatute pragude tekkimise ohtu. [5]

Betooni paigaldamisel on kannatlikkus väga olulisel kohal. Kiirustamine eri etappides, alates segamisest kuni viimistlemiseni, võib kahjustada betooni kvaliteeti ja eluiga.

Eduka ja rahuldava tulemuse saavutamiseks tuleb võtta iga sammu jaoks piisavalt aega. [3]

1.1.2 Betooni koostis

Betooni koostise valik oleneb talle määratud tingimustest, betooni hilisemad omadused peavad vastama ehitustööde projektis esitatud nõuetele, samuti vastama kasutatava betoneerimisviisiga seonduvate nõuetega. Materjalid, mida kasutatakse, peaksid vastama kehtivatele ja asjakohastele tootestandarditele. Kui need puuduvad, siis võib kasutada materjale juhul, kui arvestatakse nende omadustega. [1]

Täidetud peavad olema järgmised nõuded: konsistents, tihedus, tugevus ja kestvus. Kui projektis ei ole teisiti määratud, siis tuleb koostis projekteerida nii, et betoonisegu kihistumine ja vee eraldumine oleks minimaalne. [6]

Tsemendi valikul tuleb lähtuda valmiva betooni kasutusotstarbest, ehitusel rakendatavast tehnoloogiast, kivistumistingimustest, konstruktsiooni mõõtmetest ja sellele mõjuvatest keskkonnatingimustest. [6]

Täitematerjali valiku puhul tuleb lähtuda sarnaselt tsemendi valikule erinevatest tingimustest. Arvesse tuleb võtta rakendatavat tehnoloogiat, kasutusotstarvet ja mõjuvaid keskkonnatingimusi. [6]

Õige betoonisegu valimine on oluline. Tsemendi, täitematerjalide, vee ja lisandite vale segusuhe võib põhjustada nõrga betooni, mis on aldis pragunemisele, mahukahanemisele või liigsele poorsusele. Selle vea vältimiseks tuleb järgida tsemendi tootja antud juhiseid õigete seguproportsioonide osas ja tagada põhjalik segamine. [3]

1.1.3 Betooni paigaldamine ja järelhoolduse tingimused ehitusplatsil

Betooni saabumisel ehitusplatsile tuleb enne vastuvõtmist ja mahalaadimist kontrollida saatekirja, mahalaadimisel tuleb jälgida ja visuaalselt kontrollida, et betoonisegu oleks välimuselt normaalne. Kõik mittesoovitavad muutused tuleb viia miinimumi. Ebasoovitavad muutused on näiteks kihistumine või vee ja tsemenditaigna eraldumine. [1]

Paigaldamisel tuleb erilist tähelepanu pöörata tihendamisele kohtades, kus muutub ristlõige, kitsad ja tiheda sarrusega kohad ning süvendid ja töövuugid. Paigaldamisel ja

tihendamisel tuleb jälgida, et betooni kihistumine oleks minimaalne ning seda kaitsta päikse, tugeva tuule, külmumise, vee, vihma ja lume eest. [1]

Vastpaigaldatud betooni tuleb kaitsta kahjustavate tingimuste eest nagu ilmastikutingimused ja külmumine, plastne mahukahanemine ning kahjustavad löögid, vigastused või vibratsioonid. [4]

Olenevalt ehitustööde projektis nõutust võib vaja minna ehitustehnoloogia projekti. Selles esitatakse nõuded raketisele ja selle paigaldamisele. Peamiselt on need meetodid raketise monteerimisele ja lahtirakestamisele, vahel täpsustatakse ka nõudeid rihtimisele, ankurdamisele, koormamisele jne. Raketis peab säilitama betooni soovitud kuju kuni betoon on piisavalt kivistunud. Selle käigus peavad raketis ja selle ühendused olema nii tihedad, et peenosiste kadu oleks minimaalne. Olenevalt raketise materjalist tuleb seda töödelda nii, et betooni veekadu oleks minimaalne. Sisepind peab olema puhas, et saavutada betooni pinna nõutud viimistlus. Raketise eemaldamisel peab jälgima, et betoon oleks saavutanud piisava tugevuse, see ei tohi põhjustada pinnakahjustusi ja peab suutma vastu võtta lahtirakestamise ajal mõjuvaid koormusi. Samal ajal ei tohiks lahtirakestamine põhjustada lööke, ülekoormust ega kahjustusi konstruktsioonile. [1]

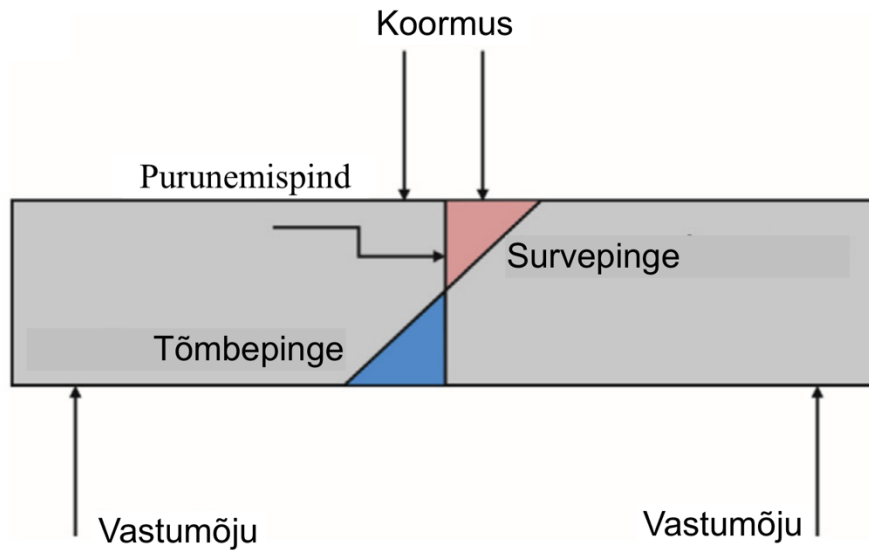
1.2 Paindetõmbetugevust mõjutavad tegurid

1.2.1 Paindetõmbetugevuse olemus

Paindetõmbetugevus on materjali mehaaniline parameeter. Paindetõmbetugevuse määrab paindepingest tingitud purunemine, võttes arvesse surve- ja tõmbepingeid purunemise lõigul (vt joonis 1). Paindetõmbetugevuse leidmiseks sooritatakse katse, kus katsekeha koormatakse paindepingeid tekitavate jõududega kuni katsekeha purunemiseni. [7]

Prismakujulisele katsekehale rakendatakse paindemoment kolme- või nelja-punkti koormusstandis, koormates seda ülemiste ja alumiste rullide kaudu. Suurim vastuvõetav koormus registreeritakse ja arvutatakse paindetõmbetugevus. Paindetõmbetugevus arvutatakse läbi katsekeha mõõtmete ja koormuse, mis rakendati viimasel hetkel enne katsekeha purunemist. [8]

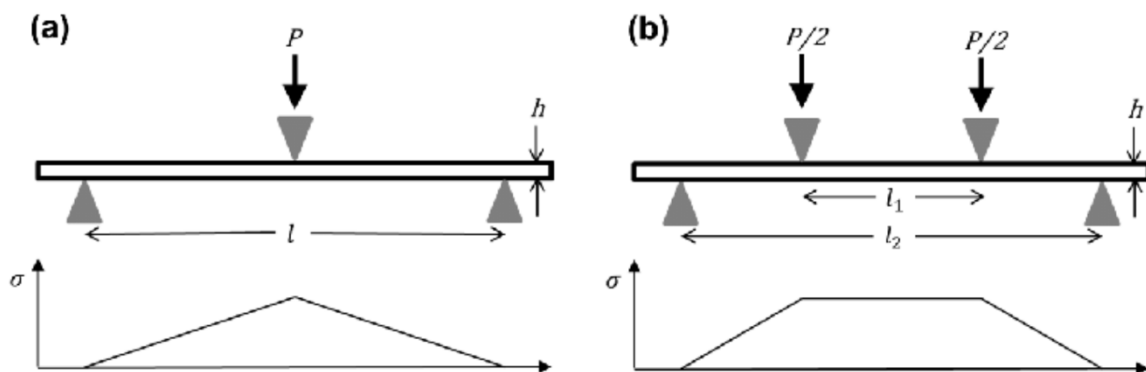
Katsekeha toetub kahele toele ning sellele rakendatakse koormus kahe ülemise rulli kaudu, mille tulemusel tekib paindemoment. Joonisel tekkinud olukorras tekib katsekeha ülemisse poolde survepinge ja alumisse poolde tõmbepinge. [9]



Joonis 1. Tala paindepingemehhanism [7]

1.2.2 Kolme-punkti ja nelja-punkti paindetõmbetugevuse katse erinevus

Destruktiivsed katsed põhinevad koormuse rakendamisel katsekehale kuni selle purunemiseni. Katsekehade paindetõmbetugevust saab leida erinevate katsemeetodite abil. Enamikul juhtudel kasutatakse paindetõmbetugevuse leidmiseks kolme või nelja toetuspunktiga katset. Need paindetõmbetugevuse katsed tekitavad katsekehas tõmbe- ja survepingeid ning jälgitakse selle füüsilist reaktsiooni. Kolme-punktilise koormamise korral tekib maksimaalne pinge koormuse rakendamise punkti kohal (vt joonis 2 (a)). Nelja-punktilise katse korral on koormus punktide vahelisel alal konstantne (vt joonis 2 (b)). [10]



Joonis 2. (a) kolmepunktilise paindekatses ja (b) neljapunktilise paindekatses tõmbepingete jaotumine piki proovikeha [42]

Kolme-punkti katse sobib homogeensetele materjalidele, näiteks plastmaterjalidele. Nelja-punkti katse on parem valik kui materjal ei ole homogeenne, näiteks

komposiitmaterjalid, puit või betoon. Kolme-punktilise katse suurim pinge on koondatud koormuspunkti alla, samas kui nelja-punkti katse pingemaksimum on laiemas piirkonnas, muutes tõenäolisemaks, et katsekeha kõige nõrgem koht jääb koormatud vahemikku. Olenevalt katsekeha materjalist võib paindetõmbetugevus olla 4-punkti katsel ligi 5% suurem kui 3-punkti katsel. On ka näiteid, kus saadakse 3-punkti katsega kõrgemad tulemused. Podstawka mudelis tehtud katse näitas, et kui katsekehale on tehtud alla sälk ja eeldades, et see on kõige nõrgem koht katsekehal, siis 3-punkti katsega ei pruugi purunemine alati esineda sälgu ristlõikes. Kuna 4-punkti katse puhul keskendutakse suuremale alale, siis selle puhul on suurem võimalus, et purunemine toimub katsekeha kõige nõrgemast ristlõikest. [11,12,13]

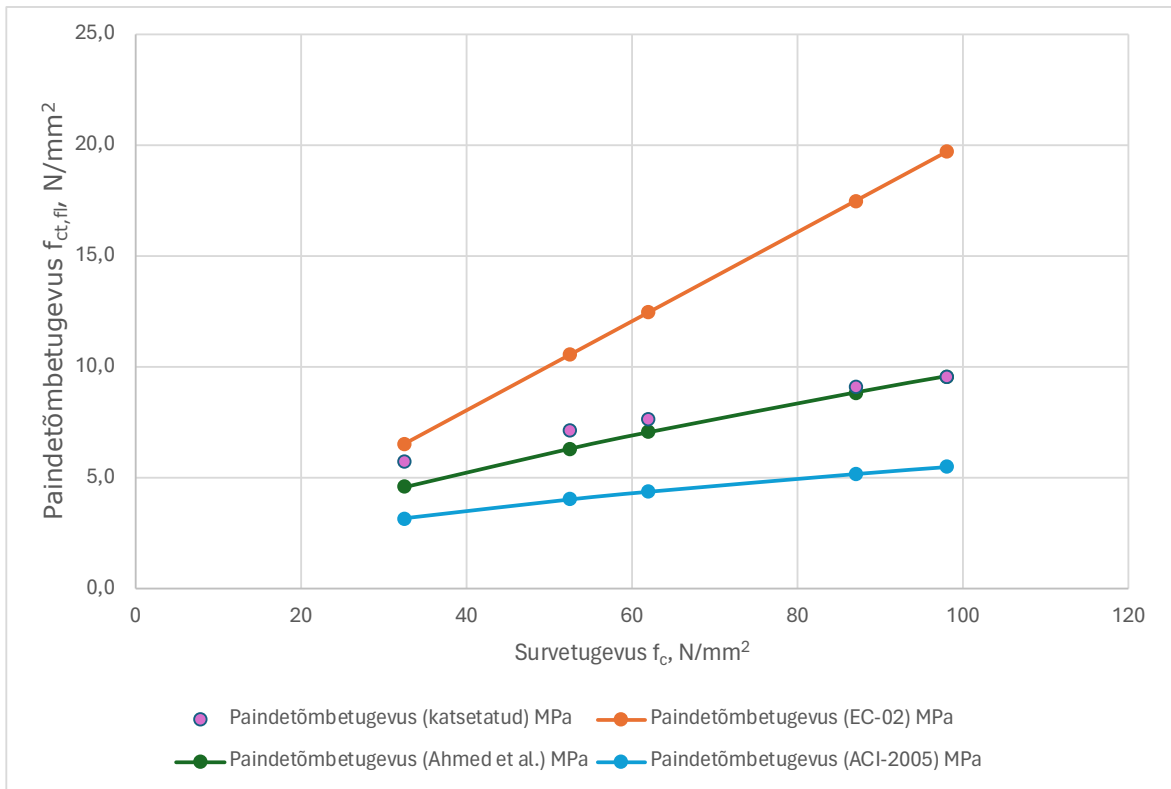
1.2.3 Survetugevuse mõju paindetõmbetugevusele

Paindetõmbetugevus ja survetugevus ei ole omavahel lineaarselt seotud, aga mitmetest uuringutest tuleb välja, et ligikaudselt võib lähtuda suhtest, et paindetõmbetugevus on kümme korda väiksem kui survetugevus. Erinevates uuringutes on toodud välja mitmeid empiirilisi võrrandeid paindetõmbetugevuse ja survetugevuse seosena. Enamik neist on paindetõmbetugevuse leidmiseks kujul $f_{ct,fl} = bf_c^n$, kus $f_{ct,fl}$ on paindetõmbetugevus, f_c on survetugevus ning b ja n on korrelatsioonikoefitsiendid. Enamik nendest võrranditest järgib ruutjuure funktsiooni, aga on ka lineaarseid funktsioone. [14,15]

Tabel 1. Empiirilised seosed paindetõmbetugevuse ja survetugevuse (kuubikuliste katsekehade) vahel

Võrrand	Allikas
$f_{ct,fl} = 0,201f_c$	EC-02 (Euroopa) [19]
$f_{ct,fl} = 0,45f_c^{2/3}$	Ahmed et al. [21]
$f_{ct,fl} = 0,554\sqrt{f_c}$	ACI-2005 [19]

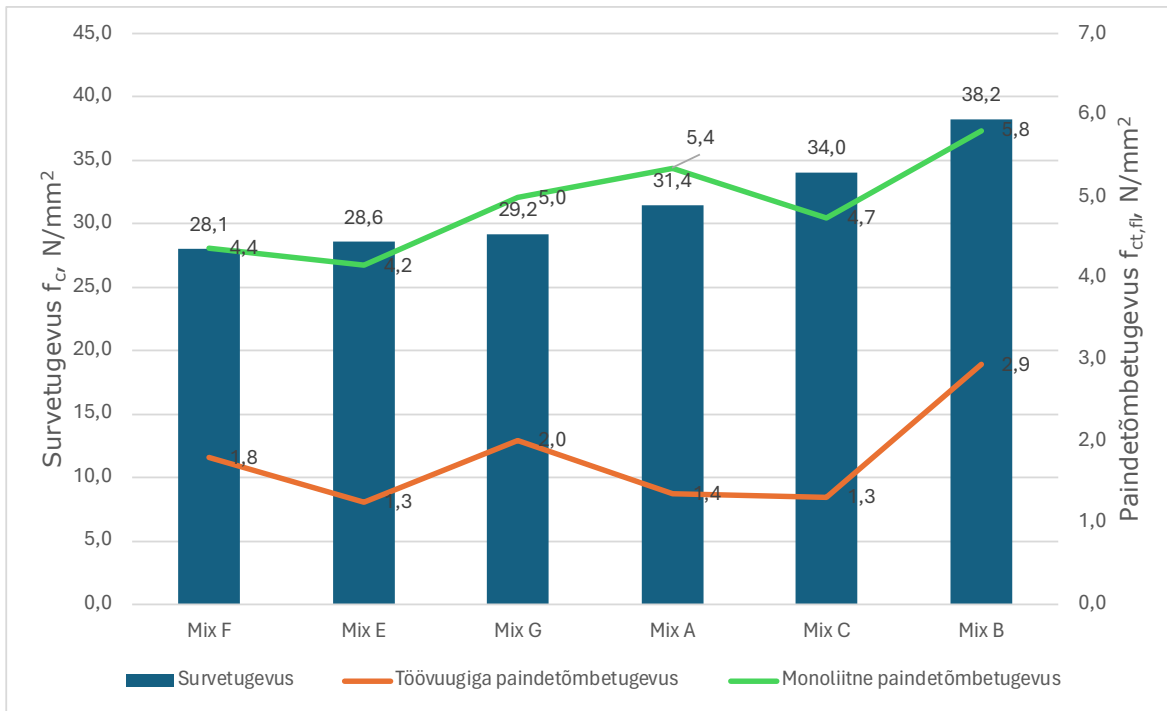
M. Ahmed tegi survetugevuse ja paindetõmbetugevuse katsed viie erineva betooniseguga ja töötas välja nende tulemuste põhjal võrrandi, mis vastaks survetugevuse ja paindetõmbetugevuse vahelisele seosele. Tema saadud katselisi tulemusi võrreldi ka joonisel 3 EC-02 (The European Commission) ja ACI-2005 (American Concrete Institute) antud võrranditega. [15]



Joonis 3. Paindetõmbetugevuse sõltuvus survetugevusest

EC-02 võrrand hindab survetugevuse kasvades paindetõmbetugevust tegelike katsetulemustega võrreldes tunduvalt suuremaks, 98 MPa juures 92% tagavara kahjuks. ACI-2005 antud võrrandi puhul on arvutuslik paindetõmbetugevus väiksem kui tegelikus - erinevus on keskmiselt 43% tagavara kasuks. Kõige ligilähedasemad arvutuslikud paindetõmbetugevused tema katsetele annab loomulikult Ahmedi enda võrrand, mis on keskmiselt 8% tagavara kasuks. [15]

Joonisel 4 on võrreldud töövuugiga katsekehade paindetõmbetugevuse suhet survetugevusega. Katsetused tehti 4-punkti katsega. Töövuuke ei hooldatud, järgmisel päeval rakestati lahti töövuugi serv ja viidi läbi teine betoonivalu. Eri betoonisegudele vastavad erinevad survetugevused. [16]



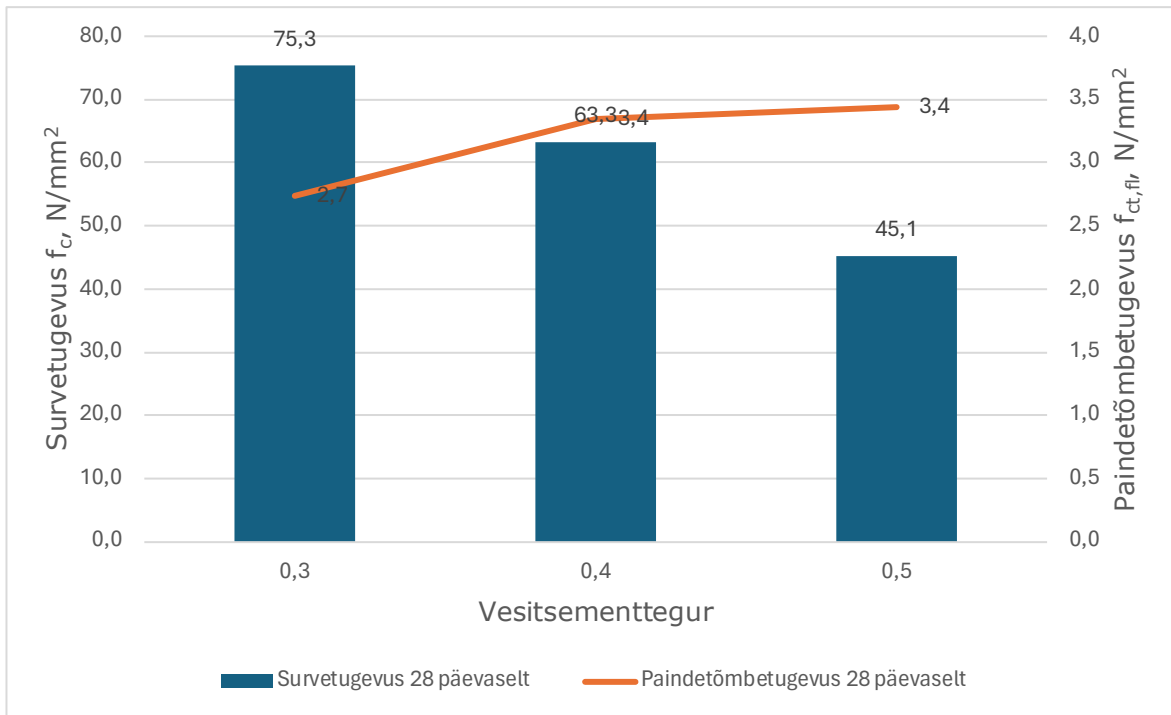
Joonis 4. Monoliitsete ja töövuugiga katsekehade paindetõmbetugevuse sõltuvus survetugevusest

Töövuugid vähendavad katsekehade paindetõmbetugevust ligikaudu 55% võrreldes monoliitsete katsekehadega. Töövuukide paindetõmbetugevuse arvutamiseks on välja pakutud valem $f_{ct,fl} = 0,28\sqrt{f_c}$. [16]

1.2.4 Vesitsementtegori mõju betooni paindetõmbetugevusele

Enamasti annab madalam vesitsementtegor betooni retseptis kõrgema survetugevuse. Kirjandusest ja standarditest tuleb välja, et betooni survetugevus võiks olla betooni paindetõmbetugevusega võrdelises seoses. [17]

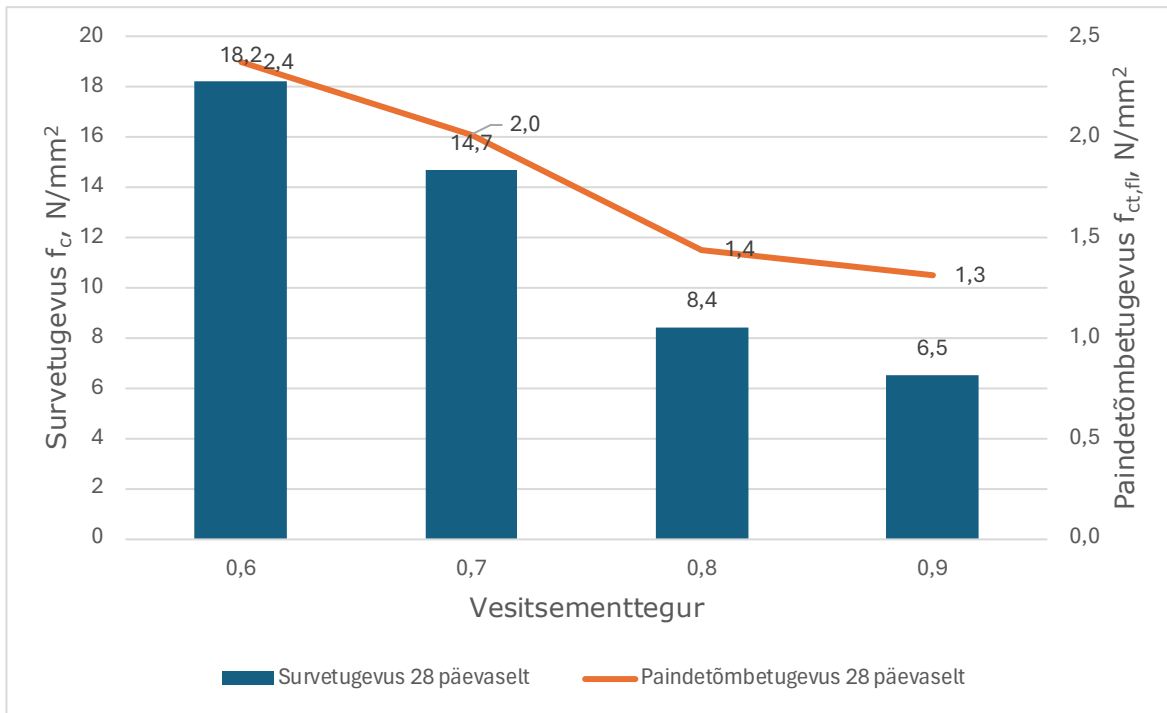
Shahi tööst nähtub, et betooni suurem vesitsementtegor mõjutab paindetõmbetugevust positiivselt. Joonisel 5 on kolme erineva vesitsementtegoriga katsekehade paindetõmbetugevused ja survetugevused. Paindetõmbetugevuse katseks kasutati 3-punkti katset. Võrreldes katsekehade paindetõmbetugevusi ja vaadeldes neid vesitsementtegorite 0,3–0,5 vahemikus, on näha, et selles ulatuses on paindetõmbetugevus kõige kõrgem vesitsementtegori 0,5 korral. See väheneb vesitsementtegori 0,4 korral 4% ja vesitsementtegori 0,3 korral 19%. [18]



Joonis 5. Vesitsementteguri (0,3–0,5) mõju betooni tugevusele

Shahihi tööst järeldub, et survetugevuse vähenedes ei pruugi paindetõmbetugevus alati väheneda, kuna siin antud olukorras see kasvab.

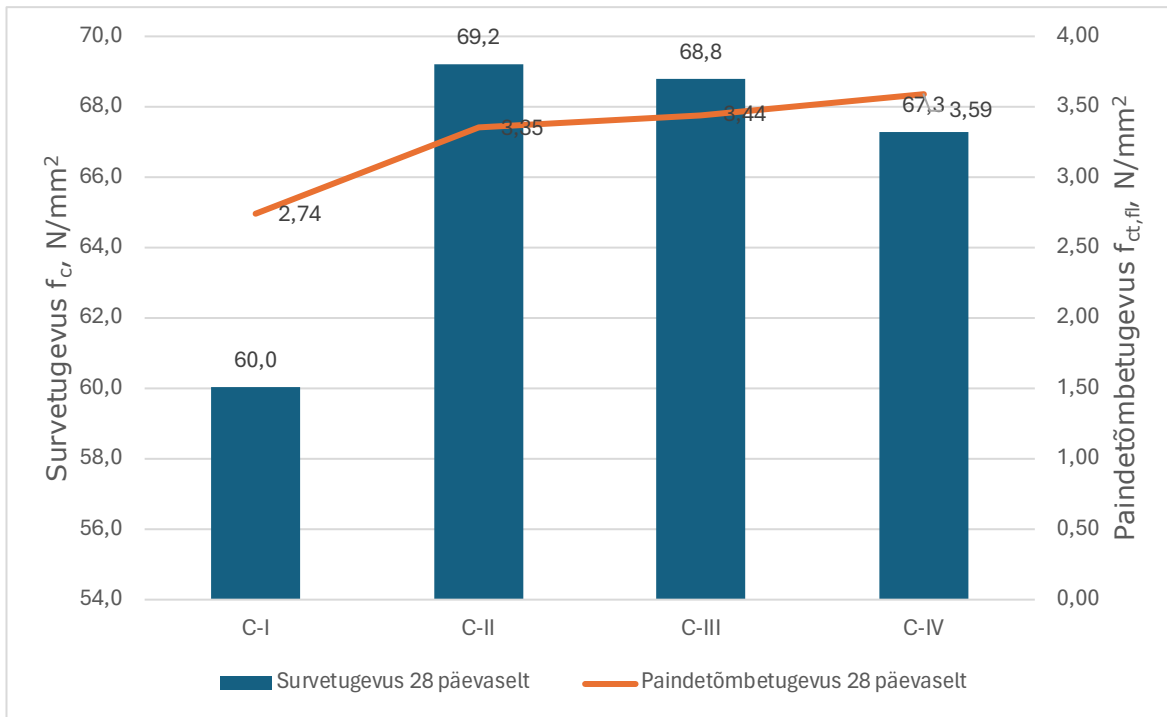
Ephraimi katsed näitavad, mis juhtub paindetõmbetugevusega siis, kui vesitsementtegur muutub vahemikus 0,6–0,9. Paindetõmbetugevuse katsed tehti 4-punkti katsetena. Jooniselt 6 näeb, et paindetõmbetugevus suureneb kuni vesitsementteguri suhe tõuseb optimaalse tasemeni. Vesitsementteguri tõusemisel 0,6 pealt 0,7 peale väheneb paindetõmbetugevus 18%. Vesitsementtegurite 0,8 ja 0,9 korral väheneb paindetõmbetugevus vastavalt 65% ja 81%. [19]



Joonis 6. Vesitsementteguri (0,6–0,9) mõju betooni tugevusele

1.2.5 Täitematerjali mõju paindetõmbetugevusele

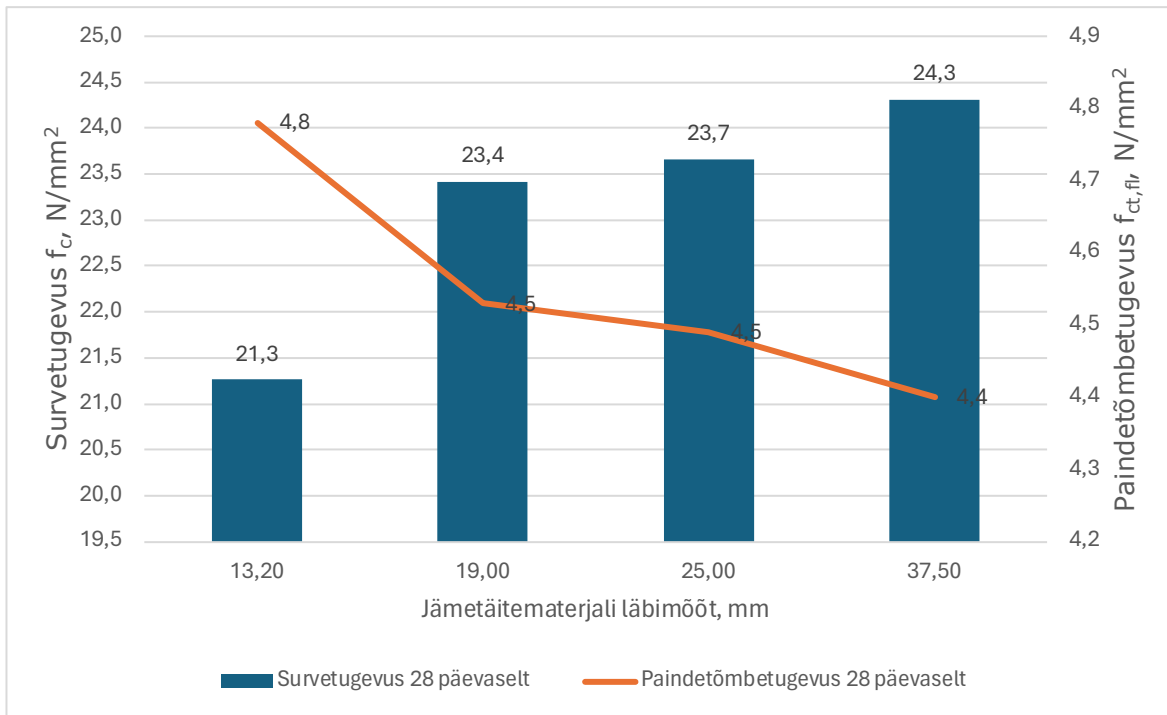
Betooni täitematerjali suurus mõjutab betooni mehaanilisi omadusi. Täitematerjali mõju paindetõmbetugevusele hindas Wei 4-punkti paindetõmbekatsega. Joonisel 7 võrreldi nelja betooniseгу retsepti (tähistatud C-I, C-II, C-III, C-IV; C - *concrete*), mis sisaldasid erineva suurusega täitematerjali. C-I puhul oli maksimaalne täitematerjali läbimõõt 4,75 mm, C-II täitematerjali läbimõõt 4,75-9,5 mm vahel ja C-III puhul jäi see 9,5-16 mm vahele. C-IV korral oli täitematerjalist 31% väiksema läbimõõduga kui 4,75 mm, 30% oli vahemikus 4,75-9,5 mm ja 39% vahemikus 9,5-16 mm. [20]



Joonis 7. Täitematerjali mõju surve- ja paindetõmbetugevusele Wei katses

C-I, C-II ja C-III katsekehade puhul suurenes paindetõmbetugevus koos täitematerjali läbimõõdu suurendamisega. C-III puhul oli paindetõmbetugevus 20% suurem kui C-I korral. C-IV katsekeha, kus kasutati kõiki eri läbimõõduga täitematerjale, saavutas kõige suurema paindetõmbetugevuse. [20]

Kui Wei katsetes oli täitematerjal läbimõõduga kuni 16 mm, siis Ajamu kasutas oma töös täitematerjali, mille läbimõõt oli kuni 37,5 mm. Antud katses kasutati betoonisegu retseptis tsemendi, peentäitematerjali ja jämetäitematerjali vahelist suhet vastavalt 1:2:4. Paindetõmbetugevuse katse teostati 4-punkti katsena. Neli erinevat retsepti tehti neljas eri läbimõõdus jämetäitematerjaliga. [21]



Joonis 8. Jämetäitematerjali mõju betooni tugevusele

Joonisel 8 on esitatud jämetäitematerjali mõju katsekeha paindetõmbetugevusele ja survetugevusele. Jämetäitematerjali läbimõõdu suurenemisel väheneb paindetõmbetugevus. Kui suurendati jämetäitematerjali läbimõõtu 13,2 mm pealt 19 mm peale, siis vähenes paindetõmbetugevus 5%. 25 mm läbimõõduga jämetäitematerjali korral vähenes paindetõmbetugevus 6% ja 37,5 mm läbimõõduga jämetäitematerjali korral 8%. Siin on vastuolu, et survetugevuse suurenedes hakkab paindetõmbetugevus vähenema. See töö näitas, et täitematerjali suuruse valik mõjutab betooni omadusi erinevalt. [21]

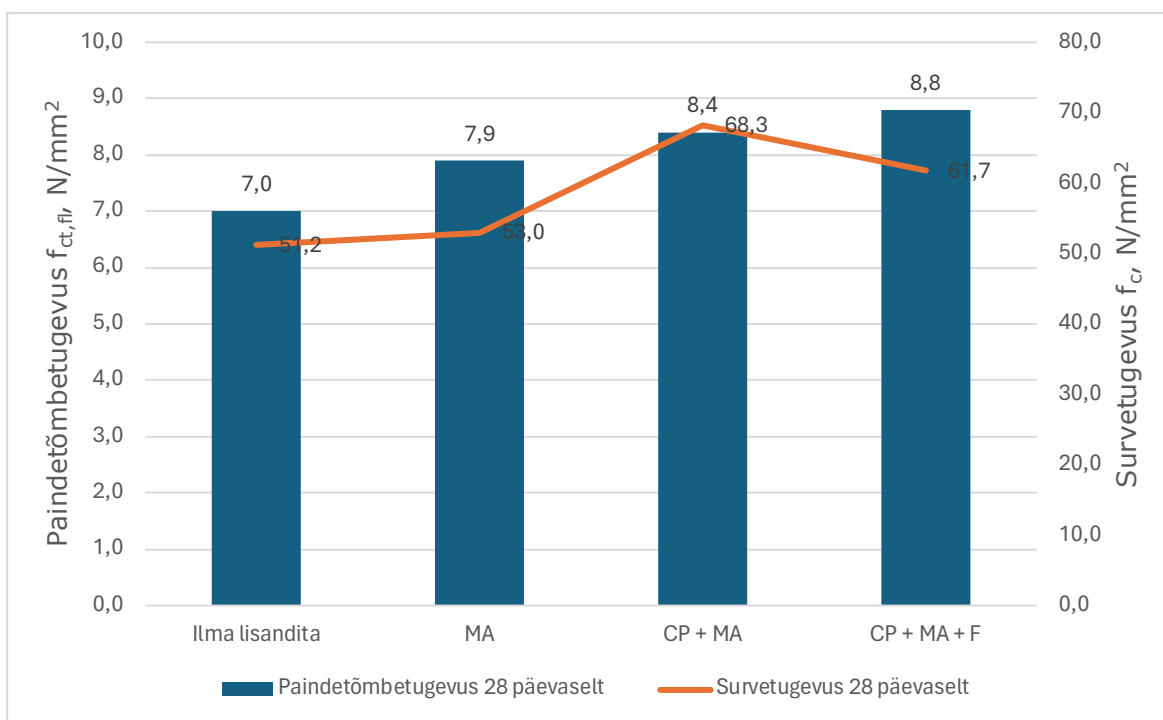
1.2.6 Lisandite mõju paindetõmbetugevusele

Lisandeid kasutatakse betoonisegu omaduste parandamiseks. Näiteks on lisanditega võimalik parandada betooni füüsikalisi ja mehaanilisi omadusi ning suurendada vastupidavust. [22]

Tolmachov uuris katsetega kuidas erinevad lisandid mõjutavad nii betooni paindetõmbe- kui ka survetugevust. Ta kasutas katsetes kolme eri tüüpi lisandeid. Need olid järgnevad: MA – mineraalne lisand, CP – keemiline lisand (karboksülaadil baseeruv superplastifikaator), F – polüpropüleenkiud.

Joonisel 9 on ilma lisanditeta paindetõmbetugevus kõige madalam. Kui kasutati mineraalseid lisandeid, suurenes paindetõmbetugevus 13%, kui kasutati keemilisi ja

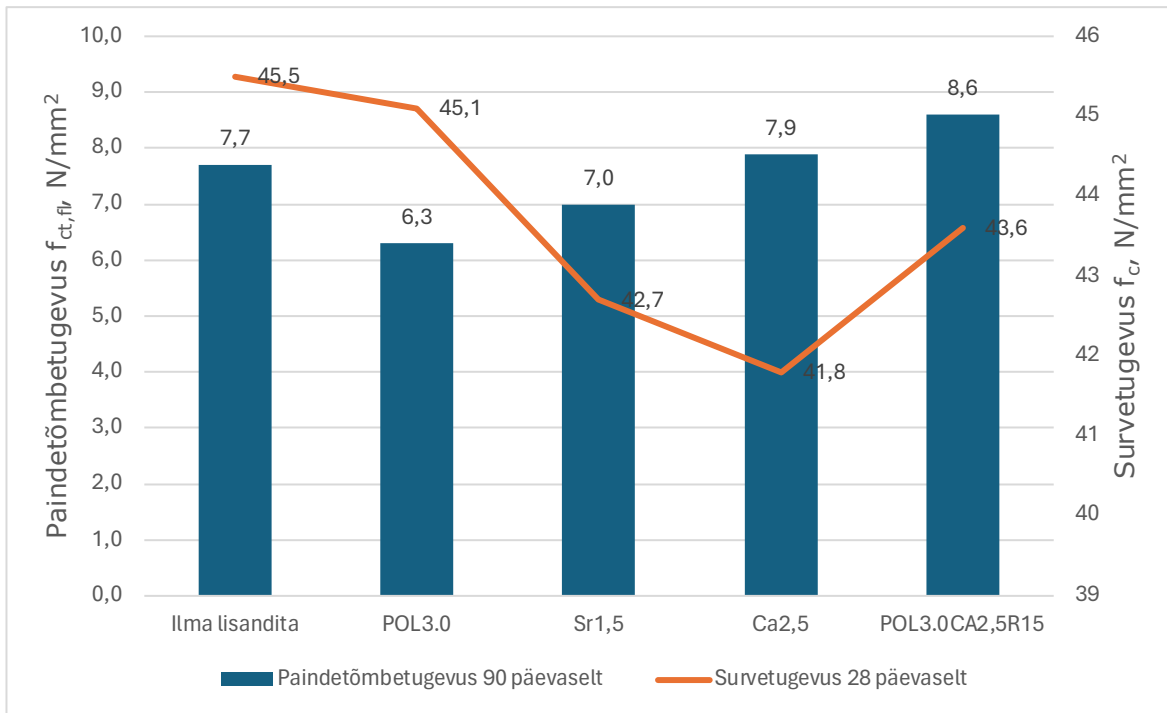
mineraalseid lisandeid, suurenes see 20%. Kui betooni retseptis kasutada kõiki kolme lisandit, siis kasvas paindetõmbetugevus 26%. Katsesest nähtub, et lisandite kasutamisel ei pruugi paindetõmbetugevuse suurenemisel survetugevus kasvada. [22]



Joonis 9. Tolmatchovi katsetulemused lisandite mõjust betooni tugevusele

Statkauskas katsetas mahukahanemist vähendava lisandi (Sr1,5), kustutatud lubja (Ca2,5) ja polüpropüleenkiu (POL3,0) mõju betooni paindetõmbetugevusele.

Joonisel 10 on kõige madalama paindetõmbetugevusega olukord, kus kasutati polüpropüleenkiudu - see on 18% madalam kui ilma lisandita katsekehadel. Mahukahanemist vähendava lisandi kasutamisel oli paindetõmbetugevus 9% madalam. Kustutatud lubja kasutamise korral suurenes paindetõmbetugevus 3% võrreldes ilma lisanditeta seguga. Kui ühes retseptis kasutati kõiki lisandeid korraga, saavutati 12% kõrgem paindetõmbetugevus. Mikroskoobi abiga tehti kindlaks, et polüpropüleenkiu pind oli suhteliselt sile ja homogeenne, see võib olla ka POL3,0 betoonisegu madala paindetõmbetugevuse põhjuseks. Suure lisandite doseeringuga segude Sr1,5 ja Ca2,5 paindetõmbetugevuse vähenemist võib selgitada lisandite üledoseerimisega. [23]



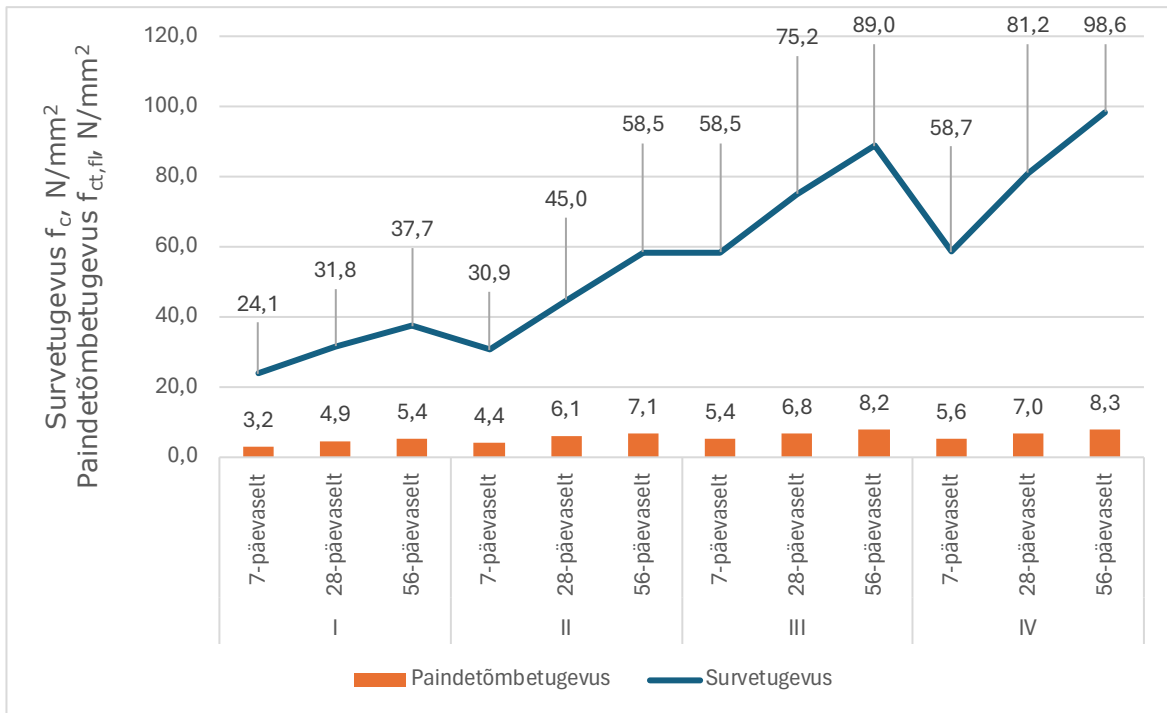
Joonis 10. Statkauskase katsetulemused lisandite mõjust betooni tugevusele

1.3 Betooni kivistumistingimuste mõju paindetõmbetugevusele

1.3.1 Betooni kivistumisaja mõju paindetõmbetugevusele

Betooni kindlates tingimustes hoidmine ja vanus mõjutavad betooni mehaanilisi omadusi, sealhulgas ka paindetõmbetugevust. Paindetõmbetugevus suureneb betooni vananemisega ja ka suurema survetugevusega betooni kasutamise korral.

Joonisel 11 on toodud betooni survetugevuse seos paindetõmbetugevusega armeerimata betooni korral. Paindetõmbetugevuse katseks kasutati 3-punkti katset. Kasutati nelja erinevat betoonisegu retsepti. Retseptis I oli v/t 0,52, retseptis II oli v/t 0,33 ja 10% ränidioksiidi lisandit, retseptis III oli v/t 0,26 ja retseptis IV oli v/t 0,26 ja 10% ränidioksiidi lisandit. Lisaks, paindetõmbetugevuse suurenemine on väiksem kui vastavalt suurema survetugevusega betoonil samas vanuses. [24]



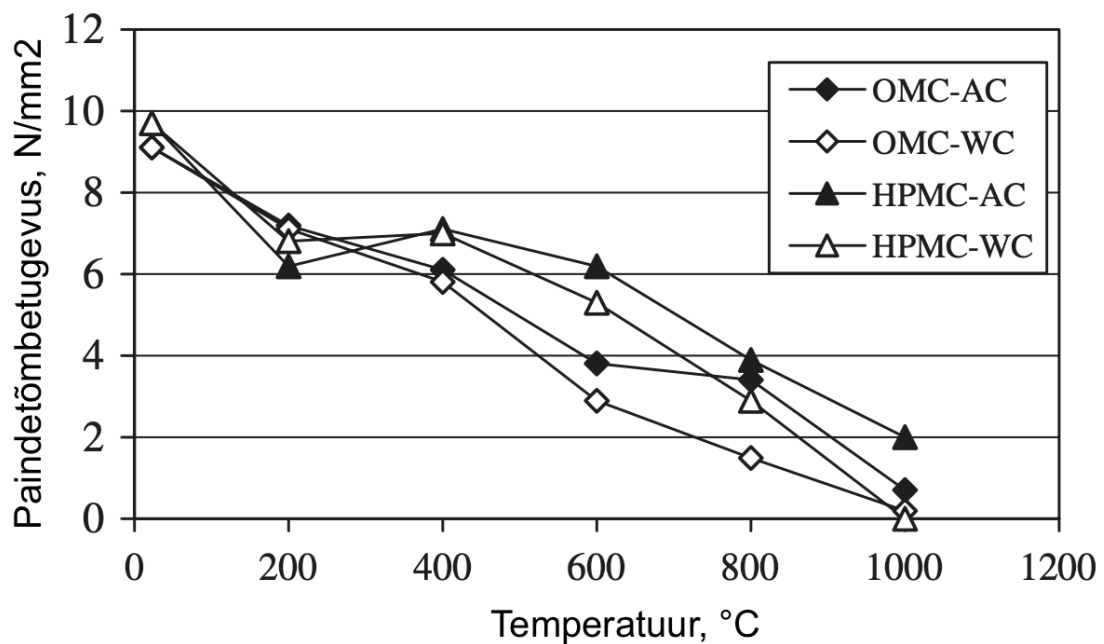
Joonis 11. Kivistumisaja mõju paindetõmbetugevusele ja survetugevusele

Eranditult kõigi katsekehade paindetõmbetugevus kasvas pikema kivistumisperioodi vältel. Vaadates kõiki erinevaid retsepte 7-päevaselt ja võrreldes neid 56-päevaste tulemustega, siis keskmiselt kasvas paindetõmbetugevus 36%. Võrreldes 7-päevaselt katsetatud katsekeha paindetõmbetugevust 28-päevaselt katsetatud katsekehaga, oli keskmine paindetõmbetugevuse kasv 26%. Võrreldes 28-päevaselt katsetatud katsekeha paindetõmbetugevust 56-päevaselt katsetatud katsekehaga, oli keskmine paindetõmbetugevuse kasv 14%. [24]

1.3.2 Temperatuuritingimuste mõju paindetõmbetugevusele

Kõrge temperatuuri mõju betooni mehaanilistele omadustele on uuritud juba 1940. aastatest. Uuritud on tsemendi, mördi ja betooniproovide käitumist kõrge temperatuuriga kokkupuutumisel.

28 päeva pärast betooni tootmist pandi katsekehad ahju vastavalt 200, 600, 800 ja 1000 °C juurde. Seejärel pandi need jahtuma kas vee või õhu kätte. Kui katsekehad olid jahtunud 23 °C-ni viidi nendega läbi paindetõmbekatsed. [25]

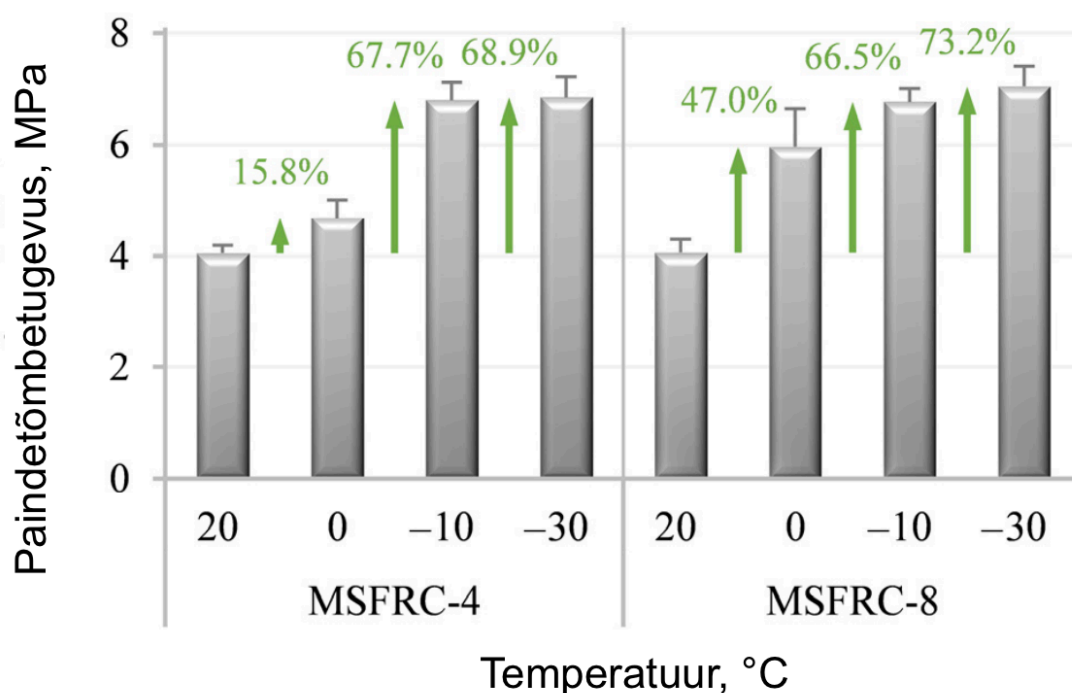


Joonis 12. Temperatuuri mõju betooni paindetõmbetugevusele [25]

Husem katsetas temperatuuri mõju betooni paindetõmbetugevusele neljal eri viisil, mis on näha joonisel 12. Märgitud on OMC (*ordinary micro-concrete*), mis on tavamikrobetoon (survetugevusega 34 MPa) ja HPMC (*high performance micro-concrete*) ehk kõrgtugev mikrobetoon (survetugevusega 71 MPa). AC (*air cooling*) on õhus jahtunud katsekehad ja WC (*water cooling*) on vees jahtunud katsekehad.

Jooniselt 12 nähtub, et katsekeha paindetõmbetugevus väheneb kuumutamisel. Juba 200 °C juures on betooni paindetõmbetugevus 21% väiksem, 400 °C juures 33% väiksem, 600 °C juures 58% väiksem ja 800 °C juures juba 63% väiksem. [25]

Stanislav Aidarov uuris külmakraadide mõju betooni paindetõmbetugevusele. Katsetusteks kasutatakse 3-punkti koormamist ja kahte betoonisegu retsepti, MSFRC-4 ja MSFRC-8. MSFRC-8 segus on kasutatud rohkem sünteetilist fiibrit kui MSFRC-4 puhul. [26]



Joonis 13. Külma kraadide mõju betooni paindetõmbetugevusele [26]

Jooniselt 13 tuleb välja, et mõlema betooni retsepti korral hakkab temperatuuri langedes paindetõmbetugevus katsekehadel suurenema. Katsed teostati kohe kui katsekehad olid saavutanud soovitud temperatuuri (vastavalt 0 °C, -10 °C, -30 °C). Langetades temperatuuri vee jäätumistemperatuurini (0 °C), suurenes betooni retseptide paindetõmbetugevus 15% ja 47%. Jätkates temperatuuri langetamist kuni -10 °C-ni, suurenes paindetõmbetugevus juba 68% ja 67% võrreldes 20 °C olukorraga. Kui temperatuuri langetati -30 °C-ni, siis nii suurt paindetõmbetugevuse suurenemist enam ei tulnud - see oli MSFRC-4 retsepti puhul 69% kõrgem ja MSFRC-8 retsepti puhul 73% kõrgem võrreldes 20-kraadise referentstemperatuuriga. [26]

2. KATSEMETOODIKA

Käesoleva magistritöö katseline osa hõlmas katsekehade paindetõmbetugevuse määramist.

Selleks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli laborit ning Mäepealse 3 teadus- ja õppehoone katsehalli. Katsekehade valmistamiseks koostati raketised. Need tehti veekindlast vineerist ja kasutades Ehituse Mäemaja töökoda aadressil Mäepealse 3. Katsekehade valamine ja katsetamine toimus Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide õppelaboris. Betooni valmistamiseks vajalik täitematerjal pärines Rudus AS-i Lagedi betoonitehasest.

Betoonivalu ja vormist lahti rakestamine toimus perioodil 22.02.–02.04.2024. Katsekehad jäeti pärast lahti rakestamist katseplaanis ette nähtud ajaks kivinema ja seejärel määrati nende paindetõmbetugevus töövuugis. Katsetamiseks kasutati hüdraulilist pressi Matest Servo-Plus Evolution koos 4-punkti paindekatse rakisega. Kasutatud segude kohta valati ka kuubikukujulised katsekehad, mida kasutati betoonisegude survetugevuse määramiseks.

2.1 Katseplaen

Allpool olevas tabelis on välja toodud katsed ja nendele viitavad katsestandardid. Katsetes kasutatud meetoodika on välja toodud järgnevates peatükkides.

Tabel 2. Teostatud katsed ja neile vastavad katsestandardid

Katse nimetus	Katsestandard
Katseplaani koostamine	EVS-EN 12390-1:2021 Kivistunud betooni katsetamine osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded
Katsekehade valmistamine	EVS-EN 12390-2:2019 Kivistunud betooni katsetamine osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine
Betoonisegu vajumiskatse	EVS-EN 12350-2:2019 Betoonisegu katsetamine osa 2: Vajumiskatse
Katsekeha tiheduse määramine	EVS-EN 12390-7:2019 Kivistunud betooni katsetamine osa 7: Kivistunud betooni tihedus
Survetugevus	EVS-EN 12390-3:2019 Kivistunud betooni katsetamine osa 3: Katsekehade survetugevus

2.2 Betoonisegudes kasutatud materjal

Tsement – katsekehade valmistamisel kasutati portlandtsementi CEM I 52,5 N. Antud tsemendi tootjaks oli Läti ettevõtte SIA Schwenk. Tsemendi kavandatud kasutusalaadeks on betoonide, krohvide ja mörtide valmistamine. Tsemendi omadused on deklareeritud standardi EN 197-1:2011 järgi. Tsemendi normsurvetugevus on pärast 28 ööpäeva vähemalt 52,5 MPa, kloriidide sisaldus on kuni 0,10%. [27]

Täitematerjal – betoonisegudes ja katsekehades kasutatud täitematerjal pärines Rudus AS-i Lagedi betoonitehasest. Peenliiva maksimaalseks tera suuruseks oli 2 mm, jämeliiva suurimaks terasuuruseks 4 mm. Killustikuks oli paas, mille maksimaalne tera suurus oli 16 mm. Betooni retsepti koostamisel võeti arvesse täitematerjali veesisaldus. Veesisalduse määramiseks võeti hulk materjali (900 g paasi, 200 g jämeliiva, 200 g peenliiva) ja kaaluti see märjalt. Seejärel paigutati kaalutud materjali kogus 24 tunniks 110 °C juurde kuivatuskappi. Pärast selle aja möödumist kaaluti sama kuiv materjal üle ja arvutati materjali veesisaldus.

Vesi – katsekehades kasutati joogivett. Lähtudes standardist EVS-EN 1008:2002, siis kasutades betoonisegus joogivett, pole seda vaja eraldi katsetada ja see loetakse betoonis kasutamiseks sobivaks. [28]

2.3 Katsetes kasutatud betoon

Katsekehade valmistamiseks kasutati nelja erinevat betooni retsepti olenevalt katsekeha tingimustest. Iga betoonisegu retsepti jaoks tehti ka 100 x 100 x 100 mm suurused kuubikud survetugevuse katsete jaoks. Kuna betoonsegu valmistamised toimusid eri aegadel, siis valmistati segu omaduste kontrolliks survetugevuse kaudu ka iga segu valmistamisel kuubikulised katsekehad.

Tabel 3. Kasutatud betoonide parameetrid ja koostised

Tavabetoon			
Möödetud parameetrid	Maksimaalne terasuurus	16	mm
	Koonuse vajum	100	mm
	Tihedus	2394	kg/m ³
	28p survetugevus	44,6	MPa

Betooni koostis	Tsement CEM I 52,5 N	322	kg/m ³
	Vesi	205	kg/m ³
	Peenliiv	114	kg/m ³
	Jämeliiv	520	kg/m ³
	Killustik (paas)	1200	kg/m ³
	Vesi-tsementtegur	0,64	
Tavabetoon lisatud veega			
Mõõdetud parameetrid	Maksimaalne terasuurus	16	mm
	Tihedus	2365	kg/m ³
	28p survetugevus	37,3	MPa
Betooni koostis	Tsement CEM I 52,5 N	322	kg/m ³
	Vesi	232	kg/m ³
	Peenliiv	114	kg/m ³
	Jämeliiv	520	kg/m ³
	Killustik (paas)	1200	kg/m ³
	Vesi-tsementtegur	0,72	
Tavabetoon lisatud fiibriga			
Mõõdetud parameetrid	Maksimaalne terasuurus	16	mm
	Tihedus	2131	kg/m ³
	28p survetugevus	13,2	MPa
Betooni koostis	Tsement CEM I 52,5 N	322	kg/m ³
	Vesi	205	kg/m ³
	Peenliiv	114	kg/m ³
	Jämeliiv	520	kg/m ³
	Killustik (paas)	1200	kg/m ³
	Fiiber (3 mm polüpropüleenkiud)	3	kg/m ³
	Vesi-tsementtegur	0,64	
Betoon C50/60			
Mõõdetud parameetrid	Maksimaalne terasuurus	16	mm
	Tihedus	2410	kg/m ³
	28p survetugevus	63,4	MPa
Betooni koostis	Tsement CEM I 52,5 N	494	kg/m ³
	Vesi	203	kg/m ³
	Peenliiv	92	kg/m ³
	Jämeliiv	421	kg/m ³
	Killustik (paas)	1174	kg/m ³
	Vesi-tsementtegur	0,41	

2.4 Katsemeetodid

Magistritöö eesmärk on uurida betooni töövuukide hoolduse ja pinnatöötluse mõju paindetõmbetugevusele. Paindetõmbetugevust võrreldakse järgmistest tingimustest sõltuvalt: pinnatöötlus, kivistumine, pinna niisutamine, valamise viivitus, betoonisegu retsept ja survetugevusklass (vt tabel 4). Vastavate tingimuste võrdlemiseks valmistati spetsiaalsed raketised betoonivaluks ning lisaks valmistati ette vormid kuubikuliste katsekehade tegemiseks.

Tabel 4. Katseplaan

Gru pi nr	Pinnatöötlus	Kivis- tumine	Niisu- tami- ne	Vala- mise viivit- us	Kivis- tumine 28 p	Betooni survetugev- us-klass	Katse- kehade arv
1	Kelluga silutud	20 °C kaetud		4 h	20 °C vees	Tavabetoon	3
2		20 °C kaetud		18 h	20 °C vees	Tavabetoon	3
3		20 °C kaetud		18 h	20 °C vees	Tavabetoon lisa veega	3
4		20 °C kaetud		18 h	20 °C vees	Tavabetoon fiibriga	3
5		20 °C kaetud		18 h	20 °C vees	Betoon C50/60	3
6		20 °C kaetud		7 p	20 °C vees	Tavabetoon	3
7		20 °C		4 h	20 °C vees	Tavabetoon	3
8		20 °C		18 h	20 °C vees	Tavabetoon	3
9		20 °C		7 p	20 °C vees	Tavabetoon	3
10		20 °C	Niisut atud	4 h	20 °C vees	Tavabetoon	3
11		20 °C	Niisut atud	18 h	20 °C vees	Tavabetoon	3
12		20 °C	Niisut atud	7 p	20 °C vees	Tavabetoon	3

13			60 °C kuivatu skapp		4 h	20 °C vees	Tavabeton	3
14			60 °C kuivatu skapp		18 h	20 °C vees	Tavabeton	3
15			60 °C kuivatu skapp		7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
16			60 °C kuivatu skapp	Niisut atud	4 h	20 °C vees	Tavabeton	3
17			60 °C kuivatu skapp	Niisut atud	18 h	20 °C vees	Tavabeton	3
18			60 °C kuivatu skapp	Niisut atud	7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
19	Silumata		20 °C		7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
20			20 °C	Niisut atud	7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
21	Teemantkettaga lihvitud		20 °C		7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
22			20 °C	Niisut atud	7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
23	Lihvimise tolm	1 mm	20 °C		7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
24		5 mm	20 °C		7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
25		Harj aga pühi tud (1 x)	20 °C		7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
26	Fiiibri pudistamine pinnale		20 °C		7 p	20 °C vees	Tavabeton	3
27	Ühes tükis		20 °C vees		0	20 °C vees	Tavabeton	3

2.4.1 Raketiste valmistamine

Lähtuvalt katseplaanist võeti eesmärk valmistada raketised viieteistkümnele katsekehale, millega saaks katsetada betooni töövuugi paindetõmbetugevust. Võttes arvesse standardis EVS-EN 12390-5:2019 ette nähtud tingimusi katsekehade paindetõmbetugevuse määramiseks, valmistati spetsiaalsed raketised. Nende valmistamiseks kasutati veekindlat vineeri, puidukruve ja terasest naelutusnurki. Eesmärk oli saada katsekeha töövuuk katsekeha keskele. Kuna valamine toimus kahes osas, siis tehti ka raketised kahes osas - alumine osa esimeseks valamiseks (vt foto 1) ja ülemine osa, mis kinnitati alumise külge enne teise poole valamist (vt foto 2).

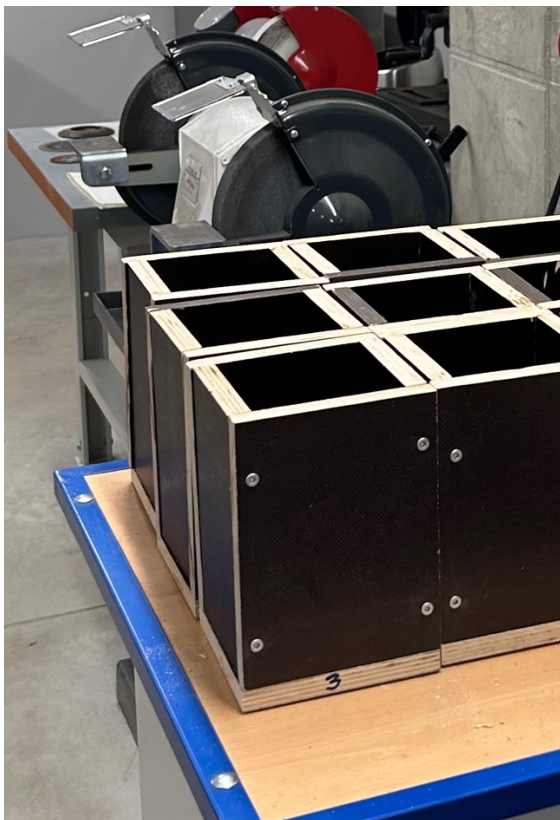


Foto 1. Raketiste alumised osad. Autori erakogu



Foto 2. Raketise ülemine osa on kinnitatud alumisele. Autori erakogu

Raketise valmistamisel pöörati tähelepanu täpsele mõõtmisele ja saagimisele, et vormid oleksid veetihedad nii servadest, põhjast kui ka keskmisest jätkukohast. Silmas peeti ka seda, et vorm ei deformeeruks betoonivalu käigus. Kuna vormid ei olnud ühekordseks kasutamiseks, siis püüti valida jätkusuutlik lahendus, et vorme saaks taaskasutada järgmiste valude korral ja see ei mõjutaks katsetulemusi.

Kõige efektiivsemaks lahenduseks vormi poolte ühendamisel tundus naelutusnurkade kasutamine. Neid kasutati ühe vormi kohta kaks tükki, paigutades need

vastasnurkadesse. Naelutusnurgad kinnitati ühe kruviga ühe vormipoole külge ja teise kruviga vormi teise poole külge. Kruvide augud olid ette puuritud, et vältida vineeri lõhenemist ja purunemist kruvide kasutamisel.

Survetugevuse katsetamisel lähtuti standardist EVS-EN 12390-3:2019. Tulenevalt sellest tehti survetugevuse katseks kuubikud servamõõduga 100 mm. Nende valmistamiseks kasutati kuubikukujuliste katsekehade plastist vorme (vt foto 3).



Foto 3. Plastist vorm. Autori erakogu

Nii surve- kui paindetõmbetugevuse katsetamiseks tuleb kindel olla, et kasutatavad vormid on terved, puhtad, seal ei leidu tolmu ega vana betoonisegu või selle jääke, mis võiks mõjutada katsekeha omadusi. Kui katsekeha mõõtmed ei vasta standardis EN 12390-1 määratletud suuruse või läbimõõdu tolerantsidele, tuleks see välja praakida või selle kuju parandada vastavalt EN 12390-3:2019 nõuetele. [29]

2.4.2 Katsekehade betoonivalu

Katsekehade valuks vajaliku betoonisegu valmistamisel kasutati betoonimikserit Soroto 40 L-30 (vt foto 5). Vahetult pärast segu segamist vormiti survetugevuse katse jaoks esimesed kuubikud. Samast segukogusest tehti uuesti kuubikud paindetugevuse katsekehade valamise lõpus.

Paindetõmbetugevuse katsekeha alumisi vorme täideti kahes osas. Alguses täideti vorm silma järgi pooleldi täis, seejärel tihendati 20 sekundit vibrolaudal (vt foto 4). Pärast esimest tihendamist täideti vormi esimene pool täielikult ja tihendati vibrolaudal veelkord 20 sekundit. Katsekehad tihendati kohe pärast vormi täitmist, et ei tekiks liigset kihistumist ega eralduks tsemenditaigent.

Pärast teist tihendamist töödeldi pind vastavalt katseplaanis märgitud tingimustele (vt foto 6) ja katsekeha pandi kindlaks ajaks kivinema katseplaaniga määratud keskkonda.

Katseplaanis toodud pinnatöötused ja hooldused olid järgnevad: kelluga silutud, silumata, teemantkettaga lihvitud, puistatud tolmuaga, puistatud fiibriga, niisutatud või niisutamata pind. Teemantkettaga lihviti esimese betoonivalu pinnast ligikaudu 2-3-millimeetrine kiht enne teist betoonivalu. Erineva paksusega tolmuikihtide korral puistati soovitud paksusega tolmuikiht kühvliga esimese betoonivalu pinnale (tolmuikihti ei surutud tihedaks, jäi nii nagu puistati) enne teist betoonivalu. Fiibrit puistati kohe esimese betoonivalu lõpus märjale betoonile. Katsekehad, mis vajasisid niisutamist enne teist betoonivalu, niisutati käsipritsi abil nii, et pinnale ei tekiks loiku, vaid see oleks õrnalt märg.



Foto 4. Vibrolaud. Autori erakogu



Foto 5. Soroto betoonimikser. Autori erakogu

Enne katsekeha teise poole betoonivalu kinnitati raketisele ülemine osa nii, et see oleks tihedalt alumise osa vastas (vt foto 7). See oli vajalik, et vältida peenosise ja vedeliku väljajooksmist vormist nii uue valu kui ka tihendamise käigus. Vormi teise poole valu tehti sarnaselt esimese poolega. Valmistati uus betoonisegu, täideti pool vormist, siis tihendati vibrolaual. Seejärel täideti vorm lõplikult ja tihendati veel kord. Pärast viimase osa tihendamist siluti katsekeha lahtine külg kelluga nii, et pind oli sile.

Sama betoonivalu alguses valatud kuubikulised katsekehad saavutasid 1–2% suurema survetugevuse, kui lõpus valatud katsekehad. Selleks, et aja möödumise mõju ei põhjustaks valetrende, jaotati ühe ja sama grupi kolm katsekeha vaheldumisi teiste katsekehadega ühe segumi valamisplaani ulatuses.



Foto 6. Katsekehade valatud alumised pooled. Autori erakogu

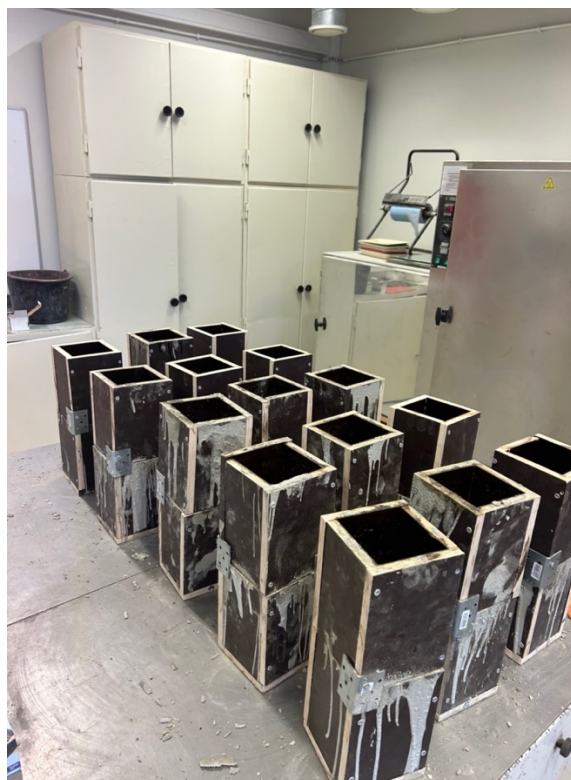


Foto 7. Tihedalt kinnitatud vormi ülemised pooled. Autori erakogu

Survetugevuse katseks valmistati iga betoonivalu käigus vähemalt kaks kuubulist katsekeha. Üks katsekeha vormiti betoonivalu alguses ja teine betoonivalu lõpus, et tuleks välja keskmine survetugevus ühe betoonivalu segu kohta. Kuubikulised katsekehad valati plastikust vormi kahes kihis. Alustuseks täideti vorm silma järgi poole ulatuses, seejärel tihendati vibrolaual 20 sekundi vältel ja täideti vormi teine pool. Seejärel tihendati uuesti vibrolaual 20 sekundit. Viimase tihendamise järel siluti katsekeha avatud pind kellu või pahtlilabidaga, vajadusel eemaldati üleliigne

betonisegu või lisati juurde segu nii, et katsekeha pind tuleks võimalikult sile ja ühtlane.

Kõik katsekehad tähistati numbritega, et oleks võimalik eristada millistele katsetamistingimustele konkreetne katsekeha vastab.

2.4.3 Katsekehade vormidest vabastamine ja hoiustamine

Paindetõmbetugevuse katsekehad pandi pärast betoonivalu 24 tunniks kile alla 20 °C juurde, et takistada kuivamist. 24 tunni möödumisel rakestati vormid ettevaatlikult lahti (vt foto 8) ning katsekehad pandi veega täidetud anumasse 28 päevaks kivistuma. Vee temperatuur oli 20 °C ± 2 °C. Katsekehad olid paigutatud nii, et kivistumine oleks kaitstud väliste tingimuste eest, nagu vibratsioon, löögid ja kuivamine.

Sarnaselt käituti ka survetugevuse kuubikuliste katsekehadega. Pärast betoonivalu pandi katsekehad 24 tunniks 20 °C juurde kile alla, seejärel võeti katsekehad vormist välja suruõhku kasutades. Pärast vormist eemaldamist (vt foto 8) asetati ka kuubikulised katsekehad 28 päevaks vette 20 °C ± 2 °C juurde.



Foto 8. Vormidest välja võetud katsekehad. Autori erakogu

2.4.4 Betooni tiheduse määramine

Betooni tiheduse määramine viidi läbi standardi EVS-EN 12390-7:2019 kohaselt. Tihedus määrati kasutades vees kaalumise meetodit. Katse käiguks on vaja nihikut, mõõtjoolauda, kaalu, märja lappi ja veeanumat. [30]

Tiheduse määramise esimese sammuna kaaluti kuubikukujulised katsekehad õhus nii, et need võeti välja otse veest, eemaldati märja lapiga üleliigne vesi ning seejärel kaaluti katsekeha õhus. Selle tulemusena saadi m_a – katsekeha mass õhus kilogrammides.

Katsekeha vees kaalumiseks asetati kaal veega täidetud ämbri kohale nii, et saaks kaalule panna riputi, mille alumine osa ulatub vette nii, et sellele paigutatud katsekeha oleks tervenisti vees ja samal aja ei puutuks kokku anuma põhja ega külgedega (vt foto 9). Kasutatud kaalu eraldusvõime oli 0,1 grammi. Kuna kaalul oli funktsioon taara nullimiseks, puudus vajadus riputi näiva massi arvestamiseks. Seejärel asetati katsekeha riputile, jälgides, et katsekeha koos riputiga ei puudutaks anuma servasid ega oleks õhumullide kinnitumist nii katsekehale kui ka riputile. Pärast seda registreeriti katsekeha m_w – uputatud keha näiv mass kilogrammides.



Foto 9. Veega anum katsekehade massi leidmiseks vees. Autori erakogu

Katsekeha mahu leidmise valem:

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w}$$

kus

V on katsekeha maht, m³;

m_a on katsekeha mass õhus, kg;

m_{st} on uputatud riputi näiv mass, kg – seda ei kasuta, sest katsetes kasutatud kaalul oli taara nullimise funktsioon;

m_w on uputatud katsekeha näiv mass, kg;

ρ_w on vee tihedus temperatuuril 20 °C, võrdub 998 kg/m³.

Tihedus arvutati katsekeha massi ja mahu määratud väärtuste alusel valemiga:

$$D = \frac{m}{V}$$

kus

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

m on katsekeha mass katsetamisaegses olekus, kg;

V on antud katsemeetodil määratud katsekeha maht, m³.

2.4.5 Betooni survetugevuse määramine kuubikukujulistel katsekehadel

Survetugevuse katse teostati kuubikukujuliste katsekehadega 28 päeva vanuselt. Selleks kasutati survekatsemasinat (vt foto 10), mis vastab EVS EN 12390-4:2019 standardi tingimustele. Survekatsemasin seadistati 0,6 MPa/s koormamiskiirusega ning 50 kN algkoormusega (vt foto 11).



Foto 10. Survekatsemasin. Autori erakogu



Foto 11. Survekatsemasina seadistus. Autori erakogu

Pärast survekatseks ette nähtud masina lähtetingimuste seadistamist pandi kuubikukujuline katsekeha surveplaatide vahele ülemise plaadi liigendi tsentrisse (vt foto 12). See on vajalik koormuse ühtlaseks jaotamiseks, et vältida ekstsentrilist koormamist. Enne katset veenduti, et katsekeha on sile. Vajadusel eemaldati eenduvad osad lihvimisega, et koormuse kandmine katsekehale oleks täispinnaga.



Foto 12. Katsekeha surveplaatide vahel. Autori erakogu

Järgmisena käivitati survekatsemasin ja alates alkoormuse saavutamisest toimus ühtlase kiirusega pidev koormuse lisamine, kuni enam ei olnud võimalik koormust suurendada. Siis fikseeriti masina ekraanilt maksimaalne koormusnäit kilonjuutonites. Selle tulemusega arvutati survetugevus kasutades järgmist valemit:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kus

f_c on survetugevus, MPa (N/mm²);

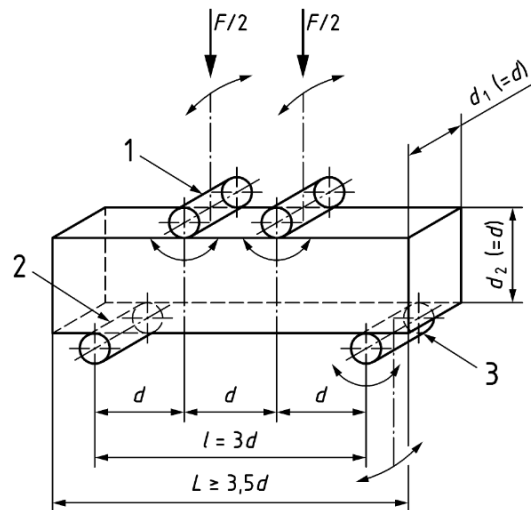
F on suurim koormus, N;

A_c on katsekeha ristlõikepind, millele survejõud mõjub, arvatud katsekeha tegelike mõõtmete alusel, mm².

2.4.6 Betooni paindetõmbetugevuse määramine

Katsekehade paindetõmbetugevuse määramine toimub standardis EVS-EN 12390-5:2019 esitatud meetodil. Katsetamiseks oli vajalik katsemasin (vt foto 13), mis peab vastama standardile EN 12390-4 ning koormamisseade (vt foto 14), mis peab koosnema kahest tugirullist ja kahest ülemisest rullist, mida ühendav vahelüli jaotab

rakendatud jõu ühtlaselt mõlema rulli vahel. Rullid said pöörduda ühes suunas, suund valiti eeldatava deformeerunud kuju järgi. Kahe tugirulli vaheline kaugus l peab võrduma kolmekordse katsekeha laiusega. Sisemiste koormamisrullide vahekaugus peab võrduma d -ga. Sisemised koormamisrullid peavad olema paigutatud välimiste vahele võrdsete vahedega nagu näidatud joonisel 5. Kõik rullid tuleb sättida joonisel 5 näidatud kohtadele, suurim lubatud viga on 2,0 mm. [8]



Joonis 14. Katsekeha koormamine (4-punkti katse) [8]



Foto 13. Koormamisrakis. Autori erakogu



Foto 14. Koormamiseks kasutatav masin. Autori erakogu

Katsekehad kontrolliti pärast hoidmiskeskonnast välja võtmist. Pöörati tähelepanu, et katsekehade kuju vastaks standardis EN 12390-1 nõutud tingimustele. Vajadusel lihviti ebatasased pinnad tasaseks ja nurkade hälbed parandati lõikamise või lihvimisega. Lihvimist vajas vähem kui kümme katsekeha ja lõikamist vajavaid katsekehasid ei esinenud. [8]

Pärast hoidmiskeskonnast välja võtmist teostati katsekehade mõõtmised nihiku ja mõõtjoonlaua abil ning katsekehad kaaluti. Katsetamine tehti pärast katsekehade mõõtmist ehk esimesel võimalusel pärast hoidmiskeskonnast välja võtmist. Katsemasina koormuspinnad pühiti puhtaks ja katsekeha rullidega kokkupuutuvatelt pindadelt eemaldati lahtine puru ja muu üleliigne materjal. Märja lapiga pühiti katsekehadelt ka üleliigne vesi. Järgmisena asetati katsekeha masinasse (vt foto 15) nii, et see oleks täpselt tsentreeritud. Koormamise suunda ei ole võimalik valida nii, et see poleks risti katsekeha valamise suunaga.

Seejärel seadistati koormamismasin (vt foto 16). Kontrolliti, et koormamis- ja tugirullid oleks katsekehaga ühtlaselt kontaktis. Koormamiskiiruseks anti ette 0,167 kN/s. Silmas peeti, et aliskoormus ei ületaks ligikaudu 20% purustavast koormusest. Koormust

rakendati ilma tõugeteta ja suurendati pidevalt konstantse kiirusega. Katsekeha purunemisel registreeriti maksimaalne koormusnäit kilonjuutonites.



Foto 15. Katsekeha koormamisseadmes. Autori erakogu



Foto 16. Koormamismasina seadistus. Autori erakogu

Paindetõmbetugevus leiti nelja-punkti paindetõmbetugevuse valemiga:

$$f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

kus

$f_{ct,fl}$ on paindetõmbetugevus, MPa (N/mm²);

F on maksimaalne koormus, N;

l on alumiste rullide vahekaugus, mm;

d_1 on katsekeha laius, mm;

d_2 on katsekeha kõrgus, mm.

Katsekeha kõrgus võeti selle järgi mispidi katsekeha paindetõmbetugevuse katsemasinasse läks.

2.5 Katsetulemuste analüüs

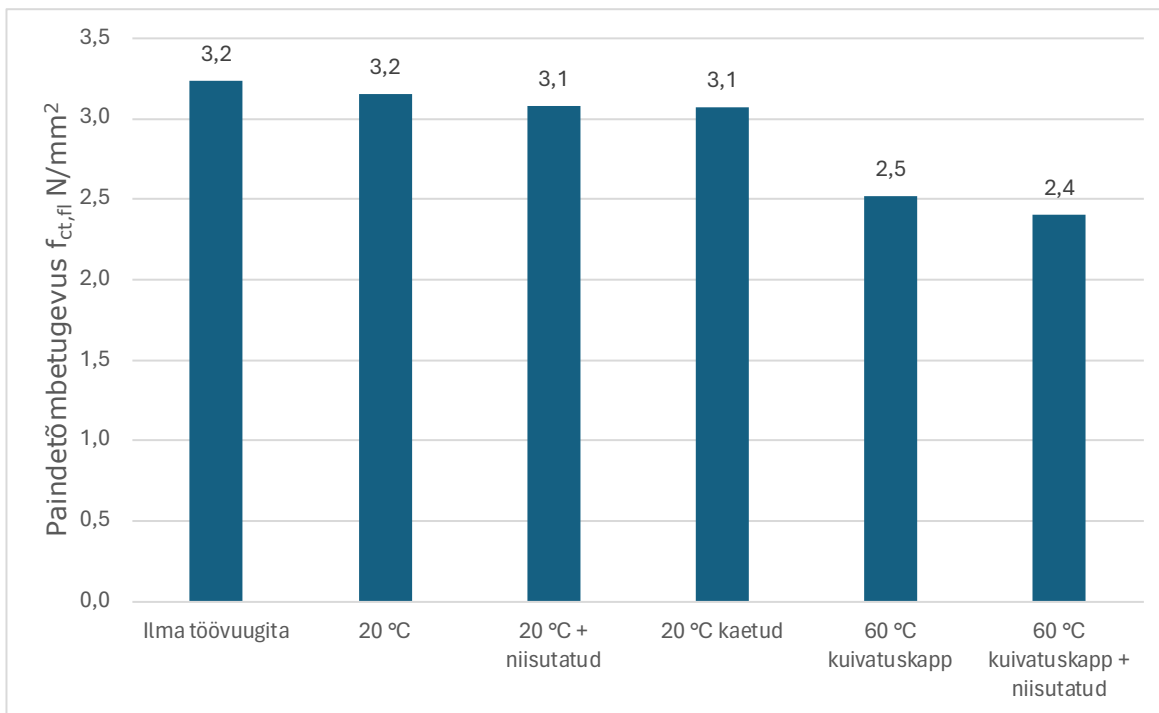
Katsete eesmärk oli uurida töövuukide pinnatöötluste ja hoolduse mõju paindetõmbetugevusele. Katsekehad, mis olid mõeldud paindetõmbetugevuse leidmiseks, olid kõik risttahuka kujuga. Katsekehade nimimõõtmeteks oli 100 x 100 x 350 mm (pikkus x laius x kõrgus). Kokku oli 27 erineva tingimusega katsekehade gruppi ja igas erinevas grupis oli kolm katsekeha. Kokku valmistati 81 prismakujulist katsekeha.

Peamised katsekehade erinevused tulenesid katsekeha pinnatöötlustest, esimese poole valamise järgsetest kivistumistingimusest, valamise viivitusest või betoonisegu retsepti erinevusest. Katsetulemuste etaloniks võeti ilma töövuugita monoliitne katsekeha. Kõik paindetõmbetugevuse katsed teostati 28 päeva pärast katsekeha viimast betoonivalu (vt tabel 4). Seega toimus katsekehade katsetamine kuues erinevas grupis (vt tabel 5). (vt Lisa 1)

Tabel 5. Katsekehade valmistamise ja katsetamise graafik

Kuupäev	Tegevus	Vastavate katsekehade jrk	Katsekehade kogus
23.02.2024	Esimene betoonivalu	6; 9; 19	9
01.03.2024	Teine betoonivalu	6; 9; 19	9
02.03.2024	Lahti rakestamine	6; 9; 19	9
05.03.2024	Esimene betoonivalu	2; 8; 11; 14;17	15
06.03.2024	Teine betoonivalu	2; 8; 11; 14;17	15
07.03.2024	Lahti rakestamine	2; 8; 11; 14;17	15
11.03.2024	Esimene betoonivalu	12; 15; 18; 20; 21	15
18.03.2024	Teine betoonivalu	12; 15; 18; 20; 21	15
19.03.2024	Lahti rakestamine	12; 15; 18; 20; 21	15
20.03.2024	Esimene betoonivalu	1; 7; 10; 13; 16	15
20.03.2024	Teine betoonivalu	1; 7; 10; 13; 16	15
21.03.2024	Lahti rakestamine	1; 7; 10; 13; 16	15
25.03.2024	Esimene betoonivalu	22; 23; 24; 25;26	15
28.03.2024	Katsetamine	6; 9; 19	9
01.04.2024	Teine betoonivalu	22; 23; 24; 25;26	15
02.04.2024	Lahti rakestamine	22; 23; 24; 25;26	15
02.04.2024	Esimene betoonivalu	3; 4; 5; 27	12
02.04.2024	Katsetamine	2; 8; 11; 14;17	15
03.04.2024	Teine betoonivalu	3; 4; 5; 27	12
04.04.2024	Lahti rakestamine	3; 4; 5; 27	12
15.04.2024	Katsetamine	12; 15; 18; 20; 21	15
17.04.2024	Katsetamine	1; 7; 10; 13; 16	15
29.04.2024	Katsetamine	22; 23; 24; 25;26	15
30.04.2024	Katsetamine	3; 4; 5; 27	12

2.5.1 4-tunnine valamisviivitus



Joonis 15. 4-tunnise valamisviivitusega katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 15 on toodud 4-tunnise töövuugi viivitusega katsekehade paindetõmbetugevused erinevates kivistumistingimustes. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt. Iga tingimuse kohta katsetati kolme katsekeha ja tulemustes on antud nende keskmine paindetõmbetugevus. Ilma töövuugita katsekeha, mis valati ilma betoonivalu viivitusega, saavutas ootuspäraselt kõrgeima paindetõmbetugevuse.

20-kraadises keskkonnas olnud katsekehad saavutasid ligikaudu sama paindetõmbetugevuse etalonkehaga. 20 °C keskkonnas ja lisaks enne betoonivalu niisutatud katsekeha saavutas sarnase paindetõmbetugevuse katsekehaga, mis pärast esimest betoonivalu kaeti kilega - nende tugevused olid vastavalt 3% väiksemad. Tulemused olid eeldatavalt sarnased, sest kilega kaetud katsekehal ei saanud pärast esimest betoonivalu toimuda vee aurustumine. 20 °C keskkonnas olnud katsekeha, millest nelja tunni jooksul toimus vee aurustumine, niisutati pritsi abil enne teist betoonivalu ning saadi sarnane olukord kilega kaetud katsekehale.

Kõige madalamad tulemused andsid 60 °C kuivatuskapis olnud katsekehad. Neli tundi 60 °C kuivatuskapis olnud katsekeha saavutas 22% madalama paindetõmbetugevuse, ja katsekeha, mida niisutati enne teist betoonivalu, saavutas 25% madalama paindetõmbetugevuse. Selle põhjuseks on betooni pealmiste kihtide väljakuivamine.

Kui võrrelda niisutatud ja niisutamata katsekeha omavahel, siis tulemuse põhjuseks võib olla see, et niisutamata katsekeha esimene pool imab teise betoonivalu käigus sisse betoonisegust tulnud tsemenditaigna ja saavutab seetõttu suurema paindetõmbetugevuse kui juba eelnevalt veega niisutatud katsekeha.

Shoukryl, kes katsetas kolme-punkti katsel ilma töövuugita katsekehasid, oli 55 °C keskkonnas kivistatud katsekeha paindetõmbetugevus oli 30% madalam kui 15 °C keskkonnas kivistatud katsekehal. [33]

Siin töös on keskmiselt 60 °C keskkonnas kivistatud katsekehadel 25% väiksem paindetõmbetugevus kui 20 °C keskkonnas kivistatud katsekehadel. Mõlemast tööst väljendub, et kõrgema kivistumistemperatuuri korral paindetõmbetugevus väheneb.



Foto 17. Ilma töövuugita katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 18. 20-kraadises keskkonnas, 4-tunnise valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 19. 20 °C keskkonnas, 4-tunnise valamisviivitusega ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 20. 20 °C kaetud keskkonnas, 4-tunnise valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Ilma töövuugita katsekehal on näha, et purunemispind on väga ebatasane (vt foto 17). Seega oli katsekeha ilma betoonivalu viivitusega valatud ja täitematerjal on terve katsekeha ulatuses ühtlaselt jaotunud, ühte nõrgendatud tasandit ei moodustu. 4-tunnise betoonivalu viivitusega ja 20 °C keskkonnas olnud töövuukidega katsekehadel on purunemispinnalt näha, et nake töövuugi kihis oli väga hea, kuna esimese valu pind oli enne teist betoonivalu veel välja kuivamata ja aktiivses kivistumises. Nii on purunemine vähemalt osaliselt kohesiivne ning töövuugi pinnal on näha väiksemaid osakesi, mis pärinevad katsekeha teise poole küljest (vt foto 18, 19, 20).



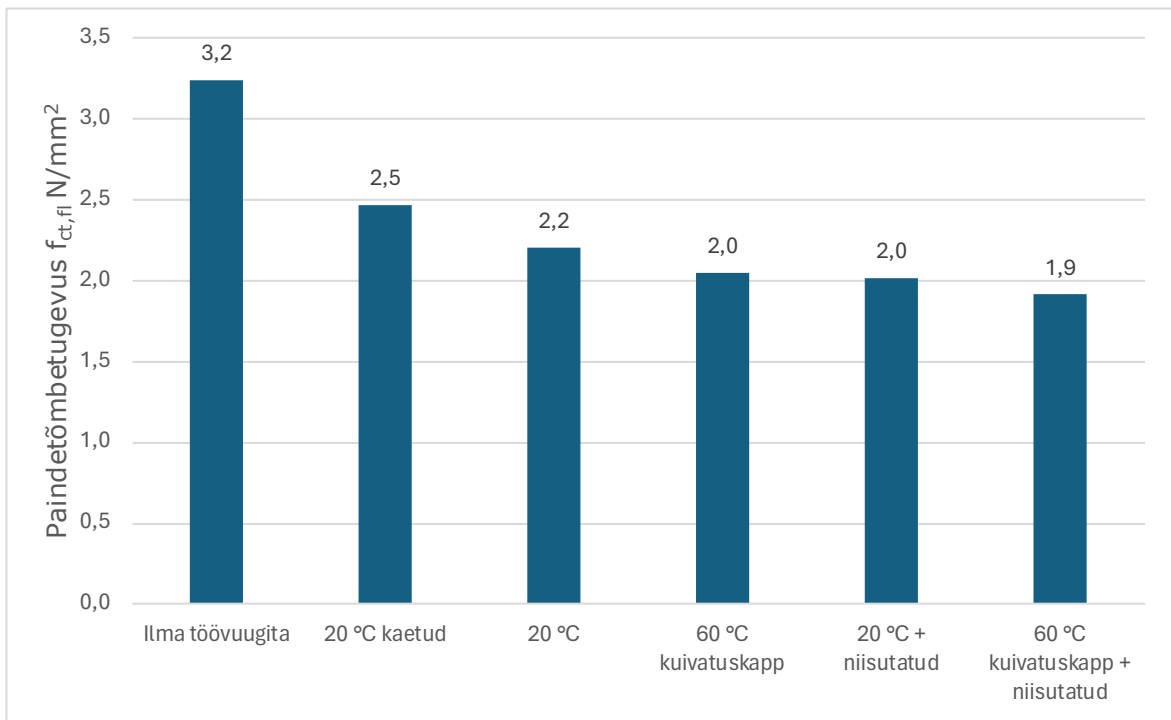
Foto 21. 60 °C keskkonnas, 4-tunnise valamiseviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 22. 60 °C keskkonnas, 4-tunnise valamiseviivitusega ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu

60 °C keskkonnas 4-tunnise valamiseviitega katsekehadele ei andnud töövuugi niisutamine paindetõmbetugevust juurde. Nii niisutatud kui ka niisutamata katsekehade purunemispind nägi sarnane välja (vt foto 21, 22). Oli näha, et 60 °C keskkonnas olnud katsekehade pind oli välja kuivanud enne teist betoonivalu ja katsekeha on purunenud adhesiivselt täpselt kahe erineva betoonivalu pinnalt.

2.5.2 18-tunnine valamisviivitus



Joonis 16. 18-tunnise valamisviivitusega katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 16 on toodud 18-tunnise betoonivalu viivitusega katsekehade paindetõmbetugevused erinevates kivistumistingimustes. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt.

20 °C ja kilega kaetud keskkonnas olnud katsekeha saavutas 22% madalama paindetõmbetugevuse etalonkehast. 18 tundi 20 °C keskkonnas olnud katsekeha paindetõmbetugevus oli 31% madalam. 60 °C keskkonnas kivistunud ning 20 °C keskkonnas ja lisaks enne betoonivalu niisutatud katsekehad saavutasid sarnase paindetõmbetugevuse, olles 38% madalamad. Kõige madalama tulemuse andis 18 tundi kuivatuskapis ja enne teist betoonivalu niisutatud katsekeha, millel oli 40% madalam paindetõmbetugevus. [34]



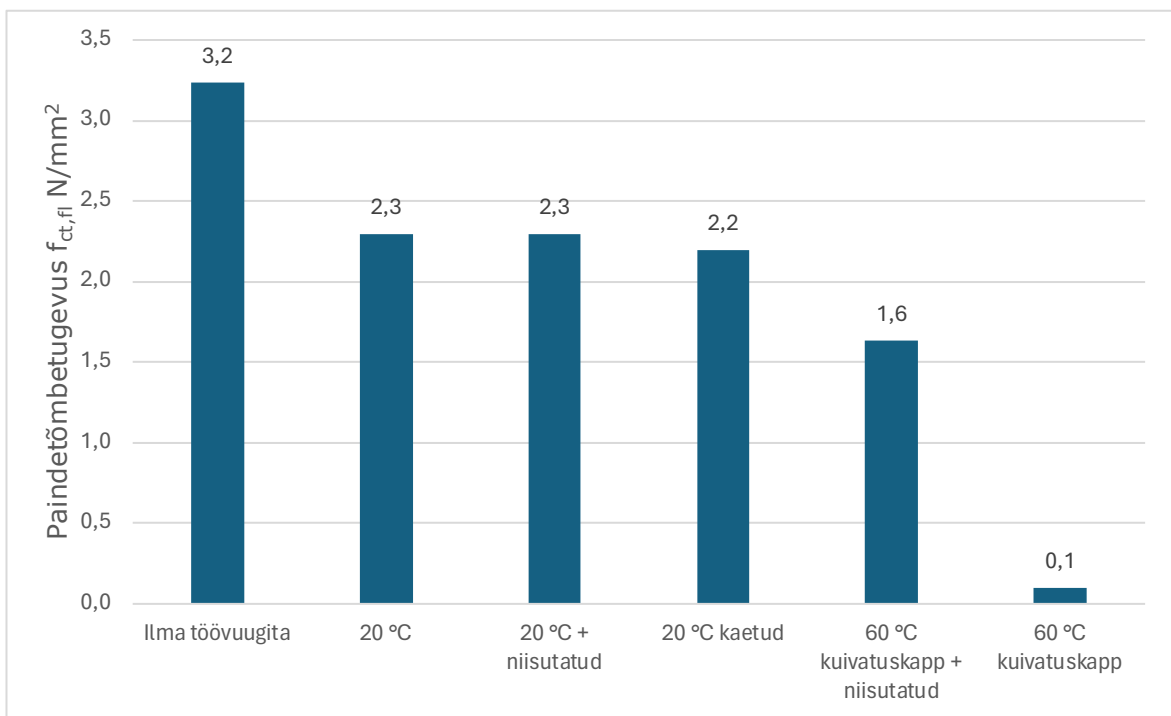
Foto 23. 20 °C kaetud keskkonnas, 18-tunnise valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 24. 60 °C keskkonnas, 18-tunnise valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

On näha, et 20 °C keskkonnas kivistunud katsekeha purunemispind on ühtlast tooni (vt foto 23). See viitab sellele, et betooni kuivamine on olnud ühtlane. 60 °C keskkonnas kivinenud katsekeha töövuugi purunemispind on vastupidiselt tunduvalt laigulisem (vt foto 24). See viitab sellele, et varasem betoon imab vee endasse ja uus vesi migreerub töövuugi juurde, kuid tsement jääb maha uude betoonisegusse, mis võis põhjustada ka paindetõmbetugevuse vähenemist.

2.5.37-päevane valamisviivitus



Joonis 17. 7-päevase valamisviivitusega katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 17 on toodud 7-päevase betoonivalu viivitusega katsekehade paindetõmbetugevused erinevates kivistumistingimustes. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt. Ainuke erinevus oli 60 °C kuivatuskapis olnud katsekehadega. Need olid nii madala paindetõmbetugevusega, et vormist lahti rakestamisel purunesid kohe kaks katsekeha. Üks katsekeha selle tingimuse kohta suudeti säilitada ja pärast 28 päeva vees hoidmist teostati paindetõmbetugevuse katse sellega.

Seitse päeva 20 °C keskkonnas hoitud katsekeha, ja sama katsekeha, mida niisutati enne teist betoonivalu, saavutasid sama paindetõmbetugevuse - see oli 28% madalam kui ühes tükis valatud katsekehal. Katsekeha, mida hoiti 20 °C juures kile all, saavutas sama paindetõmbetugevuse kui katmata olukorras. 60 °C kuivatuskapis hoitud katsekeha, mida niisutati enne teist betoonivalu, paindetõmbetugevus oli 50% madalam.

Kõige madalam tugevus oli katsekehal, mida hoiti seitse päeva 60 °C juures kuivatuskapis. Seda näitas ka see, et juba lahti rakestamisel purunesid töövuugi kohast kaks katsekeha kolmest. Nende kahe katsekeha paindetõmbetugevuseks võeti 0 N/mm². Terveks jäänud katsekehaga saadi paindetõmbetugevuse katse tulemus, võeti kolme katsekeha paindetõmbetugevuse keskmine, mis oli 97% madalam töövuugita olukorraga võrreldes.



Foto 25. 20 °C keskkonnas, 7-päevase valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

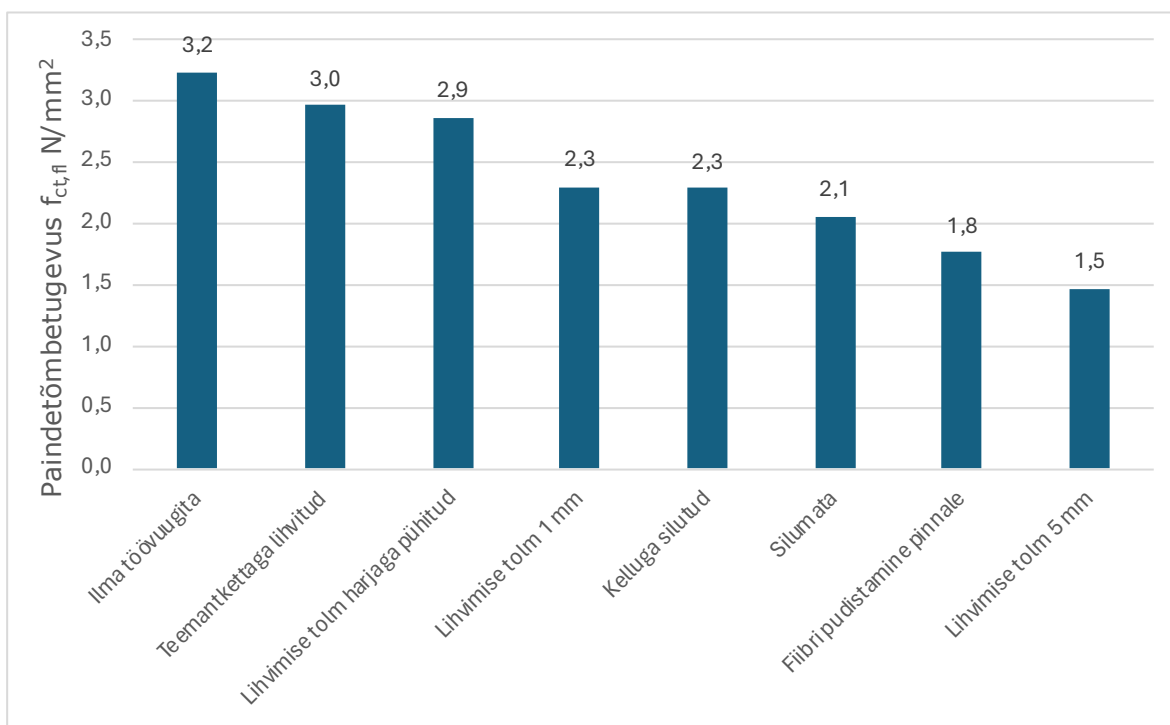


Foto 26. 60 °C keskkonnas, 7-päevase valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Võrreldes 7-päevase valamisviivitusega katsekehade purunemispindu, millest üks oli viibinud 20 °C ja teine 60 °C keskkonnas (vt foto 25, 26), oli näha, et 60 °C keskkonnas olnud katsekeha esimese betoonivalu pool oli teise valu ajal olnud soe. Pinnalt on näha, et soe katsekeha pool on kiirendanud teise betoonivalu kuivamist. 20 °C keskkonnaga

katsekeha puhul on purunemisepind tunduvalt ebaühtlasem, kui see on 60 °C keskkonnas olnud katsekeha puhul.

2.5.4 Erinev pinnatöötlus



Joonis 18. Erineva pinnatöötlusega katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 18 on esitatud erineva pinnatöötluse ja hooldusega katsekehade paindetõmbetugevused. Kõigi katsekehade esimese betoonivalu kivistumise tingimuseks oli 20 °C keskkond. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt, välja arvatud üks teemantkettaga lihvitud katsekeha.

Antud katsekehade saavutas ühes tükis valatud kehale kõige lähedasema paindetõmbetugevuse teemantkettaga lihvitud katsekeha, mille paindetõmbetugevus oli 6% madalam. Katsekehal, millelt oli lihvimise tolmi harjaga ühe korra pühitud, saavutas 10% madalama paindetõmbetugevuse. Katsekeha, millel oli 1-millimeetrine kiht lihvimistolmu ning kelluga silutud katsekeha saavutasid sarnase paindetõmbetugevuse, mis oli 28% etalonist madalam. Silumata katsekeha paindetõmbetugevus oli etalonist 34% madalam. Fibiiri pudistamine töövuugi pinnale ei omanud betooni paindetõmbetugevusele head mõju - see oli 44% nõrgem. Antud katsekehade andis ootuspäraselt kõige madalama paindetõmbetugevuse katsekeha, mille pinnal oli ligikaudu 5 mm lihvimise tolmu. Antud katsekeha oli võrdluskehast 53% nõrgem.

Selgus, et harjaga ühe korra tolmu pühkimise puhul oli paindetõmbetugevus 26% suurem kui 1-millimeetrise tolmu kihiga katsekeha korral ning 5-millimeetrise lihvistolmu korral 53% suurem.

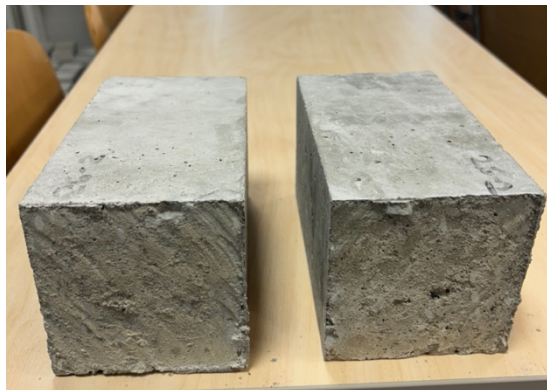


Foto 27. Teemantkettaga lihvitud 7-päevase valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

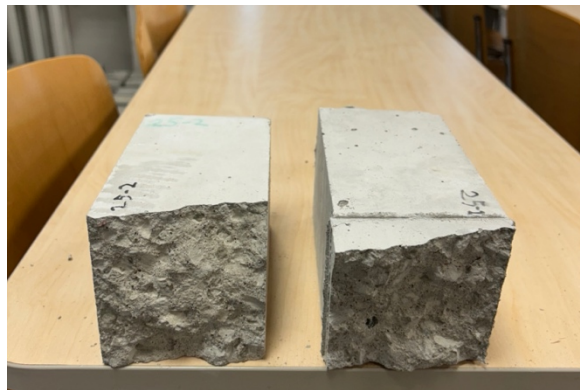


Foto 28. Teemantkettaga lihvitud ja väljaspool töövuuki purunenud katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Katsekehad, mille esimese betoonivalu pind lihviti teemantkettaga (vt foto 27), saavutasid kõrgema paindetõmbetugevuse kui teised pinnatöötled arvatavasti sellepärast, et ära lihviti tsemenditaigast tekkinud nõrgem kiht ja nii saavutati parem ühendus esimese betoonipoolega. [35] Ühe sellise katsekeha puhul saavutas töövuuk suurema tõmbetugevuse kui betoon selle lähedal - see oli kõikidest katsetest ainus selline katsekeha (vt foto 28).



Foto 29. Lihvimise tolmu harjaga pühitud pärast 7-päevast valamisviivitust, katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 30. 1 mm lihvistolmu pärast 7-päevast valamisviivitust, katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Võrreldes ühe korra harjaga tolmu pühitud purunemispinda (vt foto 29) 1-millimeetrise lihvistolmu kihiga (vt foto 30), siis oli purunemispinnalt näha, et lihvistolm ei olnud teise betoonivalu ajal seguga segunenud ning ühe või teise

katsekeha poole küljes oli palju väikseid osakesi. Harjaga pühitud purunemispinnalt selliseid väikseid osakesi ei leitud.



Foto 31. Kelluga silutud 7-päevase valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 32. Silumata pinnaga 7-päevase valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Silumata pinnaga purunemispinnal (vt foto 32) oli näha, et tsemenditaigen oli imatud rohkem esimese betoonivalu pinnale, kui kelluga silutud katsekehal (vt foto 31). Tsemenditaigena migreerumine vähendab betooni pinna naket ja sellest tulenevalt on ka paindetõmbetugevus väiksem.



Foto 33. Puistatud fiibrikihiga 7-päevase valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

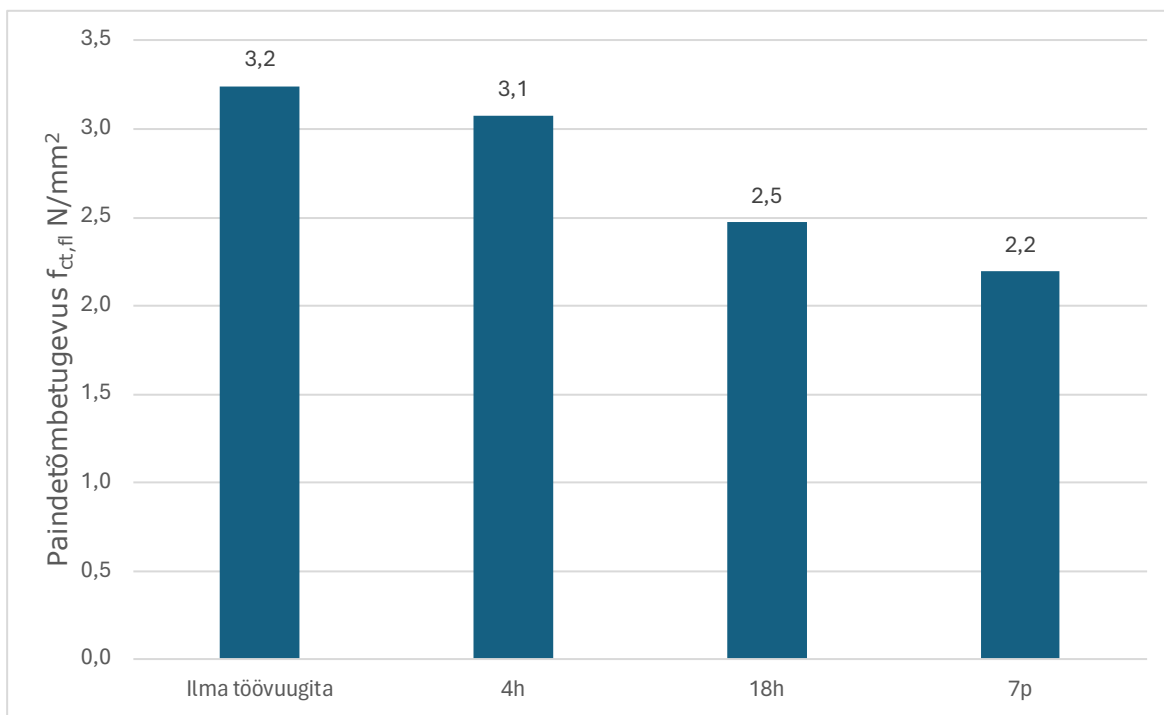


Foto 34. 5-millimeetrise lihvimistolmuga 7-päevase valamisviivitusega ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Pinnale puistatud fiibriga katsekeha purunemispind (vt foto 33) näitas, et fiibrikiud olid purunemisel suhteliselt võrdselt jaotunud mõlema katsekeha poole vahel. Paindetõmbetugevus vähenes arvatavasti sellisel juhul seetõttu, et tänu fiibrile oli betoonivalu pindadel vähem pinda betoonisegude omavahelisele kokkupuutele, samuti suurendab fiiber vee ja tsemendivajadust selles piirkonnas. Sarnane olukord oli ka

5 mm lihvistolmuga katsekeha purunemispinna puhul (vt Foto 34). Purunemispinnalt olid hästi eristavad tolmuosakesed.

2.5.5 Erinev valamisviivitus 20 °C keskkonnas, kaetud



Joonis 19. Erineva valamisviivitusega 20 °C keskkonnas kaetud katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 19 on erineva betoonivalu viivitusega katsekehade paindetõmbetugevused olukorras, kus kõik katsekehad kaeti pärast esimest betoonivalu 20 °C keskkonnas kilega. Kõik töövuuigiga katsekehad purunesid töövuuigi kohalt.

Antud tingimuste põhjal oli paindetõmbetugevus seda suurem, mida lühem oli betoonivalu viivitus. 4-tunnise valamisviivituse korral vähenes paindetõmbetugevus võrreldes etalonkehaga 3%. Esimesest betoonivalust 18 tunni möödudes vähenes paindetõmbetugevus 22%. Seitse päeva pärast esimest betoonivalu oli katsekeha paindetõmbetugevus 31% madalam. Sama tulemuseni jõudis oma töödes Zega ja Kara - mida pikem on valamise paus, seda madalamaks läheb paindetõmbetugevus. [38, 39]



Foto 35. Ilma töövuugita katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 36. 4-tunnise valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Ilma töövuugita katsekeha purunemispind (vt foto 35) on tervenisti tekkinud betooni koheisivil purunemisel. 4-tunnise valamisviivituse korral on purunemispind (vt foto 36) osaliselt tekkinud betooni koheisivil purunemisest, aga osaliselt ka madalast adhesiivsest tugevusest töövuugis. 4-tunnise valamisviivituse korral ei olnud betoonipind veel täielikult kivistunud ja selle tulemusena tekkis mõnes osas ka betooni purunemine. [36]



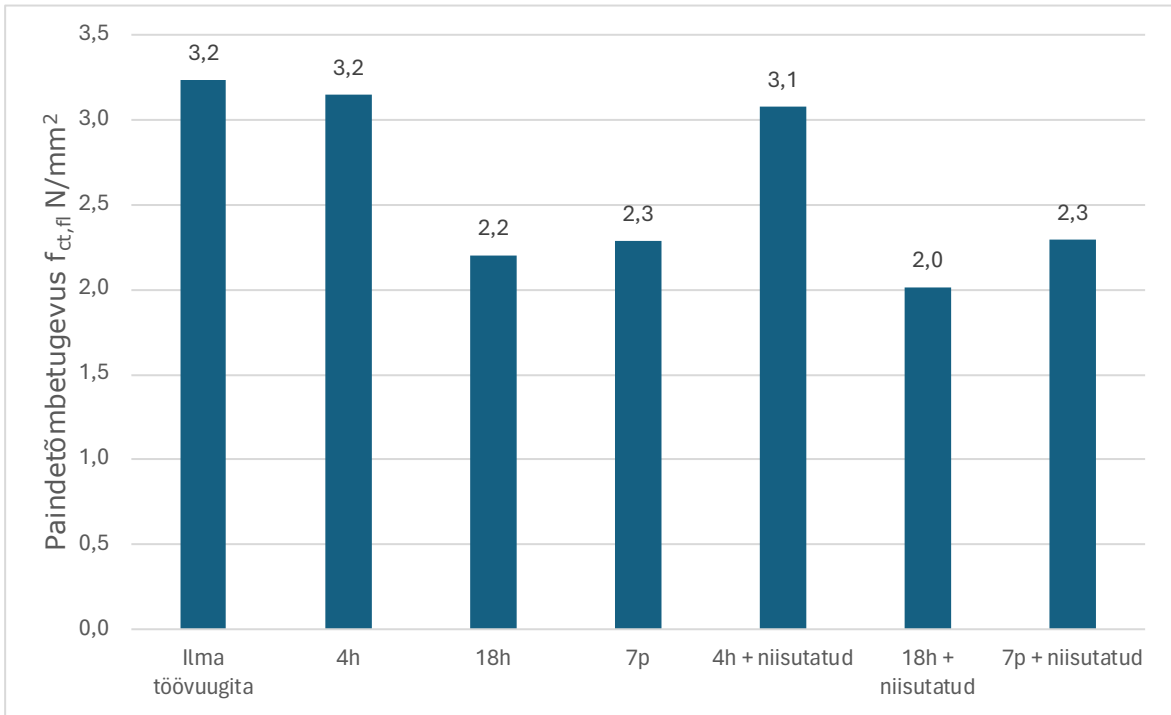
Foto 37. 18-tunnise valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 38. 7-päevase valamisviivitusega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Vaadates 18-tunnise (vt foto 37) ja 7-päevase (vt foto 38) valamisviivitusega katsekehade purunemispindade pilte, siis oli mõlema olukorra puhul esimese betoonivalu küpsusaste enne järgmise valu algust kõrge. See oli ka põhjuseks miks 4-tunnise valamisviivituse korral oli paindetõmbetugevus 20–30% suurem.

2.5.6 Erineva valamisviivitusega 20 °C keskkonnas

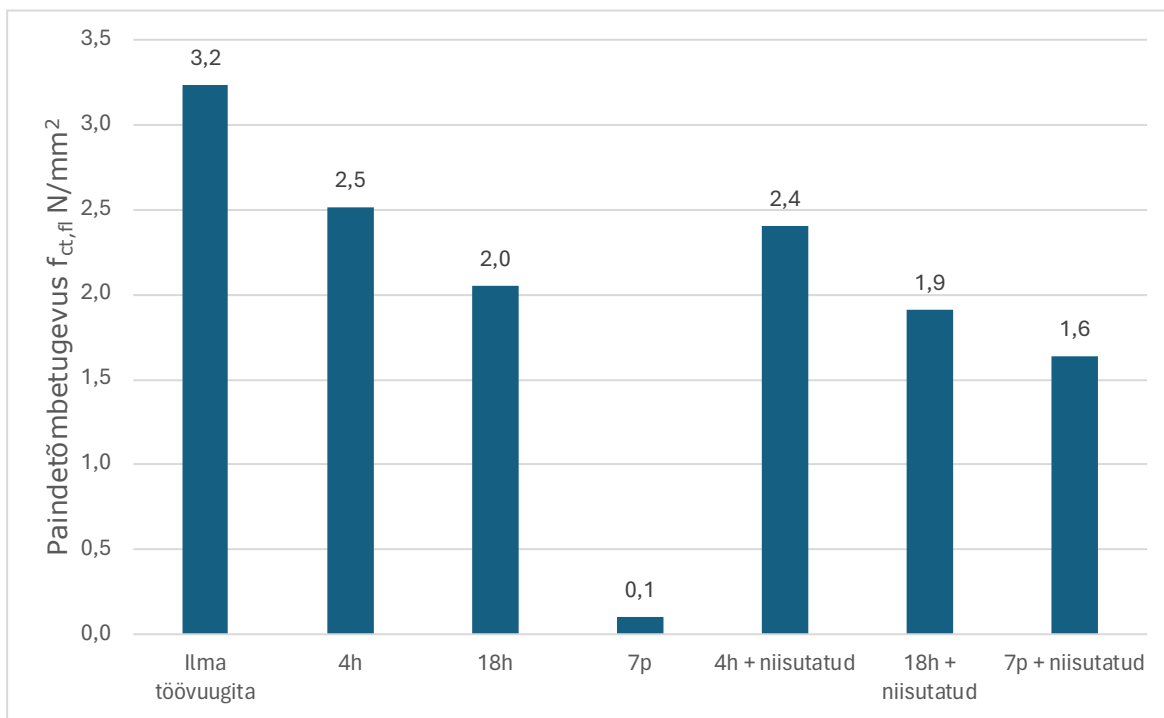


Joonis 20. Erineva valamisviivitusega 20 °C keskkonnas niisutatud ja niisutamata katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 20 on erineva betoonivalu viivitusega katsekehade paindetõmbetugevused olukorras, kus kõik katsekehad pandi pärast esimest betoonivalu 20 °C keskkonda ning osasid niisutati enne teist betoonivalu, osasid mitte. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt.

Antud tingimuste põhjal oli paindetõmbetugevus seda suurem, mida lühem oli betoonivalu viivitus. 4-tunnise valamisviivituse korral oli paindetõmbetugevus etalonkehaga ligikaudu sama ja niisutamise korral 3% madalam võrreldes ilma töövuugita katsekehaga. Esimesest betoonivalust 18 tunni möödudes vähenes paindetõmbetugevus 31% ja niisutades 38%. Seitse päeva pärast esimest betoonivalu oli katsekeha paindetõmbetugevus 28% madalam ja niisutades samuti 28%.

2.5.7 Erineva valamisviivitusega 60 °C keskkonnas

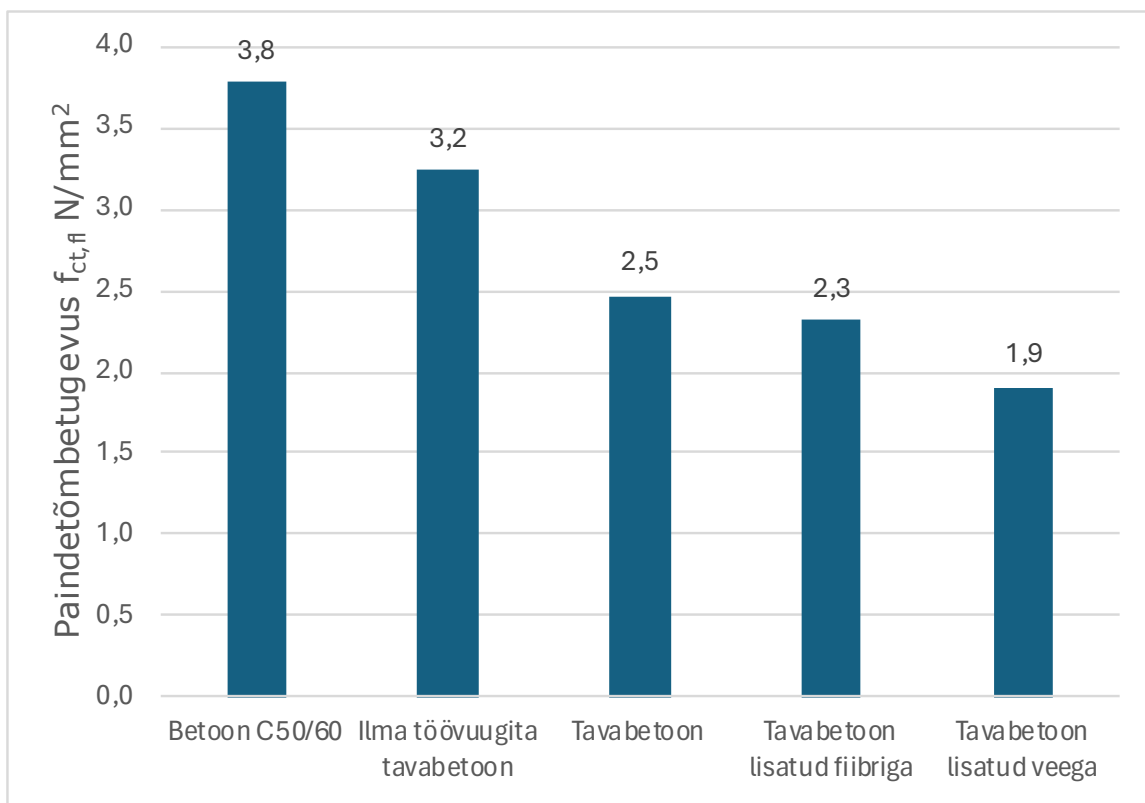


Joonis 21. Erineva valamisviivitusega 60 °C keskkonnas niisutatud ja niisutamata katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 21 on erineva betoonivalu viivitusega katsekehade paindetõmbetugevused olukorras, kus kõik katsekehad viidi pärast esimest betoonivalu 60 °C keskkonda ja osasid niisutati enne teist betoonivalu, osasid mitte. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt. Kaks katsekeha, mille valamisviivitus oli seitse päeva ja mida enne teist valu ei niisutatud, purunesid lahtirakestamisel. Nende katsekehade paindetõmbetugevuseks võeti keskmise leidmisel 0 N/mm².

Antud tingimuste põhjal oli paindetõmbetugevus seda suurem, mida lühem oli betoonivalu viivitus. 4-tunnise valamisviivituse korral vähenes paindetõmbetugevus 22% ja niisutamise korral 25% võrreldes ilma töövuugita katsekehaga. Esimesest betoonivalust 18 tunni möödudes vähenes paindetõmbetugevus 38% ja niisutades 41%. Seitse päeva pärast esimest betoonivalu oli katsekeha paindetõmbetugevus 97% madalam ja niisutades 50%.

2.5.8 Erineva betoonisegu mõju paindetõmbetugevusele



Joonis 22. Erineva betooniseguga katsekehade paindetõmbetugevus

Joonisel 22 on erineva betoonisegu retseptiga katsekehade paindetõmbetugevused. Kõik katsekehad kaeti pärast esimest betoonivalu kilega ja betoonivalu viivitus oli 18 tundi. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt.

Võrreldes töövuugiga katsekehasid ühes tükis valatud katsekehadega, siis kasutades betoon C50/60 retsepti saadi 19% suurem paindetõmbetugevus, kui ühes tükis valatud tavabetooni segu kasutades. Vaadates sama retseptiga katsekeha ühes tükis ja koos töövuugiga, saadi töövuugiga katsekehal 22% madalam paindetõmbetugevus. Polüpropüleenfiibri kasutamine betoonisegu retseptis (tavabetoon lisatud fiibriga) vähendas paindetõmbetugevust 28% võrreldes ühes tükis oleva katsekehaga. Vee lisamine betoonisegule (tavabetoon lisatud veega) vähendas paindetõmbetugevust 41%.

Võrreldes tavabetooni retseptiga katsekeha ja tavabetooni lisatud fiibriga katsekeha, vähenes paindetõmbetugevus 8%. Selle võimalik põhjus on polüpropüleenfiibri suhteliselt sile pind. Kui Tolmachov katsetas polüpropüleenfiibrit (1 kg/m^3 betoonisegu kohta) koos mineraalsete ja keemiliste lisanditega, siis saavutas ta 26% kõrgema paindetõmbetugevuse võrreldes ilma lisanditeta olukorraga. [22, 23]



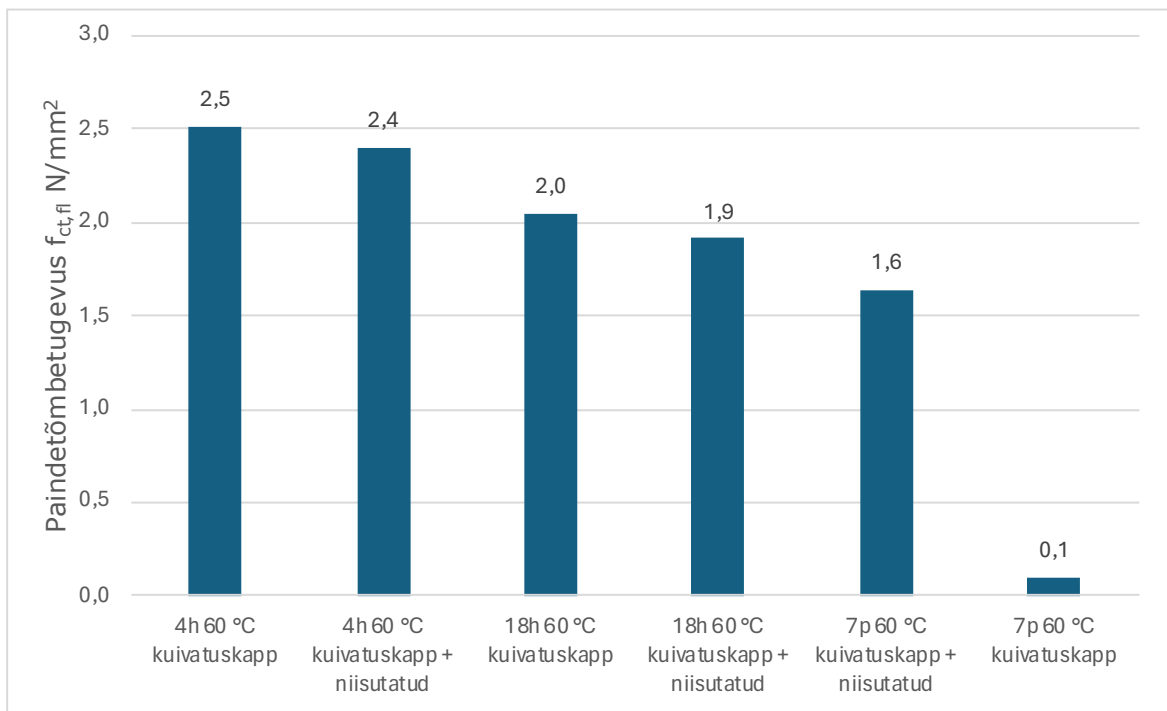
Foto 39. C25/30 fiibriga katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 40. C25/30 rohke veega katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Vaadeldes tavabetoonile lisatud fiibriga katsekeha purunemispinda (vt foto 39), oli näha, et töövuugi mõlemale pinnale on jäänud fiibri osakesi. Üks põhjus miks paindetõmbetugevus selle katsekeha puhul vähenes, tuleb välja ka Statkauskase tööst, kes uuris polüpropüleenfiibri pinda, mis oli suhteliselt sile ja homogeenne [23]. Tavabetoonile lisatud veega katsekeha purunemispinnalt (vt foto 40) oli näha, et vesine tsemenditaigen on jäänud esimese betoonivalu lõpus pinnale ja tekitanud ebatasase paksusega nõrgema kihi.

2.5.9 Valamisviivituse ja niisutamise mõju paindetõmbetugevusele 60 °C keskkonnas



Joonis 23. Valamise viivituse ja niisutamise mõju 60 °C juures kivistunud katsekehade paindetõmbetugevusele

Joonisel 23 on erineva betoonivalu viivituse ja niisutamisega katsekehade paindetõmbetugevused, mis kivistusid jätkuvalu eel 60 °C kuivatuskapis. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt. Ainuke erinevus oli 60 °C kuivatuskapis seitse päeva olnud katsekehade - need olid nii madala paindetõmbetugevusega, et vormist lahtirakestamisel purunesid kaks katsekeha kohe. Üks katsekeha selle tingimuse kohta suudeti säilitada ja paindetõmbetugevuse katsetehti pärast 28 päeva vees hoidmist sellega.

Sarnaselt 20 °C juures kile all kivistatud olukorrale, oli ka 60 °C kuivatuskapis olevate katsekehade paindetõmbetugevus madalam vastavalt sellele, mida pikem oli betoonivalu viivitus. Tulemusi võrreldi 4-tunnise betoonivalu viivitusega. Vastavalt sellele vähenes 18-tunnise viivituse korral paindetõmbetugevus 20% ja 7-päevase viivituse korral 65%.



Foto 41. 4-tunnise valamisviivitusega 60 °C keskkonnas katsekeha purunemispind. Autori erakogu

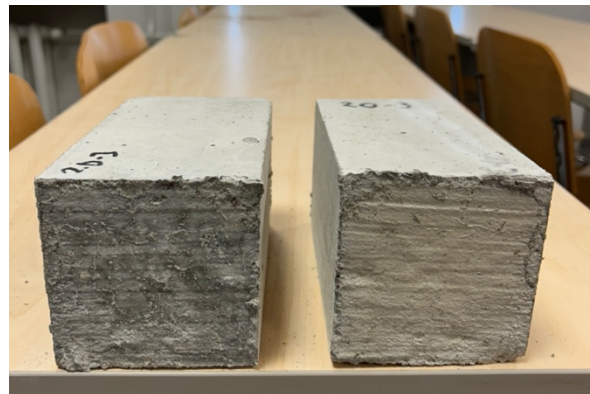


Foto 42. 4-tunnise valamisviivitusega 60 °C keskkonnas ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 43. 18-tunnise valamisviivitusega 60 °C keskkonnas olnud katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 44. 18-tunnise valamisviivitusega 60 °C keskkonnas olnud ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu



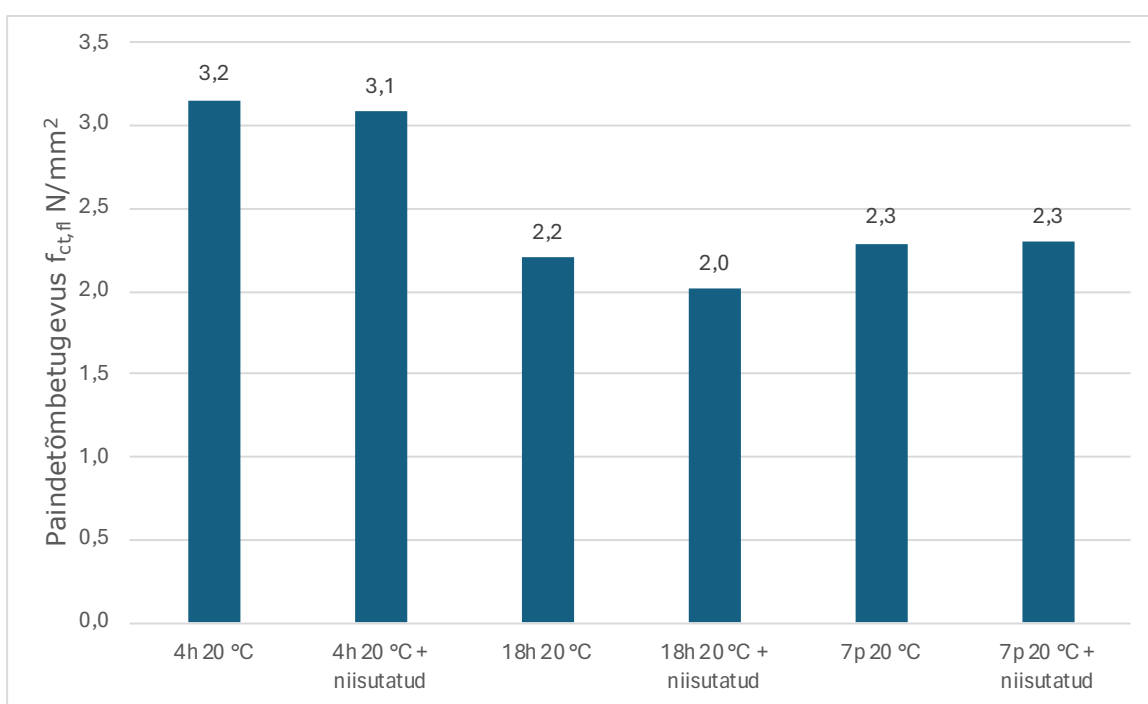
Foto 45. 7-päevase valamisviivitusega 60 °C keskkonnas olnud katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 46. 7-päevase valamisviivitusega 60 °C keskkonnas ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Omavahel võrreldi 60 °C keskkonnas esimese betoonivalu järel kivistunud katsekehade purunemispindasid (vt fotod 41–46) ning katsekeha pinna niisutamise mõju erinevate valamisviivituste korral. Võrreldes 60 °C keskkonnas olnud katsekehade niisutamise mõju, oli purunemispindadelt näha, et niisutamine tegi alumise pinna märjaks ja nii imas see teisest betoonivalust vähem vett endasse. Niisutatud pindadel oli teise betoonivalu pind heledam kui niisutamata kehadel ning see näitas vee lokaalset ja väga kiiret kuivamist. [41]

2.5.10 Valamisviivituse ja niisutamise mõju paindetõmbetugevusele 20 °C keskkonnas



Joonis 24. Valamise viivituse ja niisutamise mõju 20 °C juures kivistunud katsekehade paindetõmbetugevusele

Joonisel 24 on erineva betoonivalu viivituse ja niisutamisega katsekehade paindetõmbetugevused, mis kivistusid 20 °C juures. Kõik töövuugiga katsekehad purunesid töövuugi kohalt, seega olid kõik katsekehad omavahel võrreldavad.

20 °C juures kivistunud katsekehade kõige parema paindetõmbetugevuse saavutas 4-tunnise betoonivalu viivitusega katsekeha. Katsekehad, mis kivistusid betoonivalude vahel seitse päeva, saavutasid 27% madalama paindetõmbetugevuse võrreldes 4-tunnise viivitusega. 18-tunnise betoonivalu viivituse korral vähenes paindetõmbetugevus 33%.

20 °C keskkonnas kivistunud katsekehade puhul selgus, et vuugi pinna niisutamine enne teist betoonivalu paindetõmbetugevust oluliselt ei mõjutanud. 7-päevase betoonivalu viivituse korral jäi paindetõmbetugevus samaks. Võrreldes 4-tunnise betoonivalu viivitusega katsekehi, saadi tulemuseks, et niisutatud pinnaga katsekeha paindetõmbetugevus oli 3% madalam kui niisutamata pinna oma. 18-tunnise valamise viivituse korral oli niisutatud pinnaga katsekeha paindetõmbetugevus 9% madalam kui niisutamata pinna oma.



Foto 49. 18-tunnise valamisviivitusega 20 °C keskkonnas katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 50. 18-tunnise valamisviivitusega 20 °C keskkonnas ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 47. 4-tunnise valamisviivitusega 20 °C keskkonnas katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 48. 4-tunnise valamisviivitusega 20 °C keskkonnas ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu



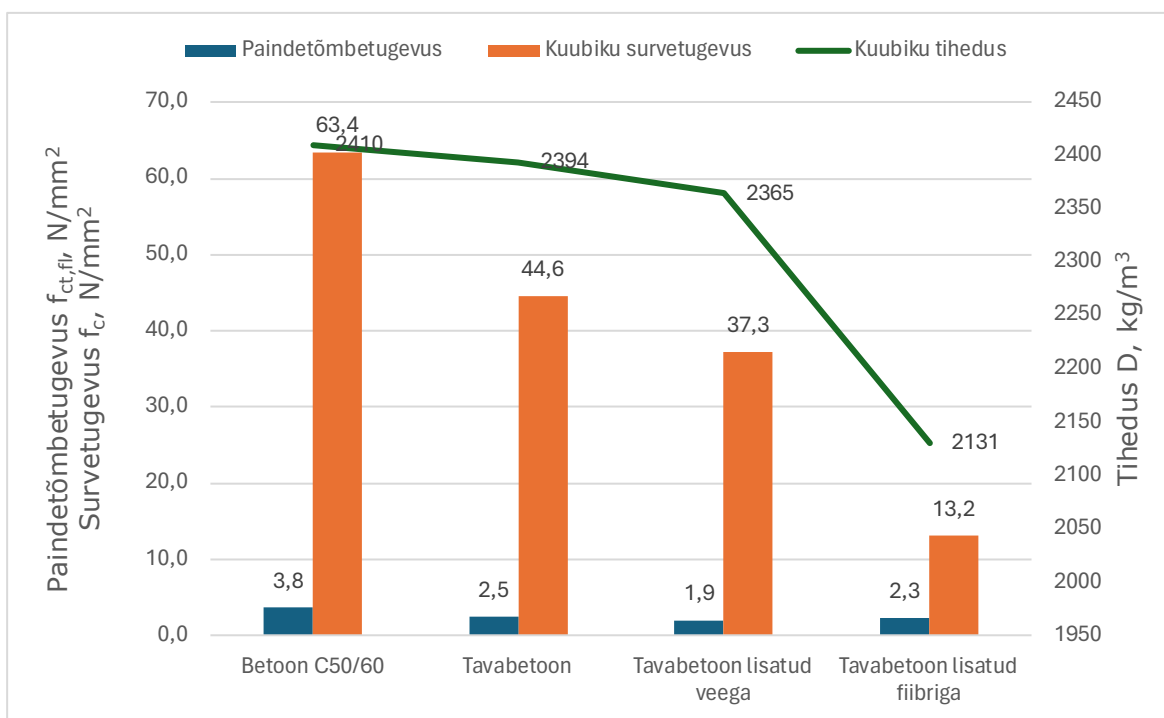
Foto 51. 7-päevase valamisiivitusel 20 °C keskkonnas katsekeha purunemispind. Autori erakogu



Foto 52. 7-päevase valamisiivitusel 20 °C keskkonnas ja niisutatud katsekeha purunemispind. Autori erakogu

Omavahel võrreldi 20 °C keskkonnas esimese betoonivalu järel kivistunud katsekehade purunemispindasid (vt fotod 47–52) ning katsekeha pinna niisutamise mõju erinevate valamisiivituste korral. Purunemispinnad nii niisutatud kui ka niisutamata katsekehade puhul olid erinevate valamisiivituste korral suhteliselt sarnased. Ka katsetulemused näitasid, et niisutamise ja mitteniisutamise korral on paindetõmbetugevus suhteliselt sarnane.

2.5.11 Survetugevuse mõju katsekehade paindetõmbetugevusele



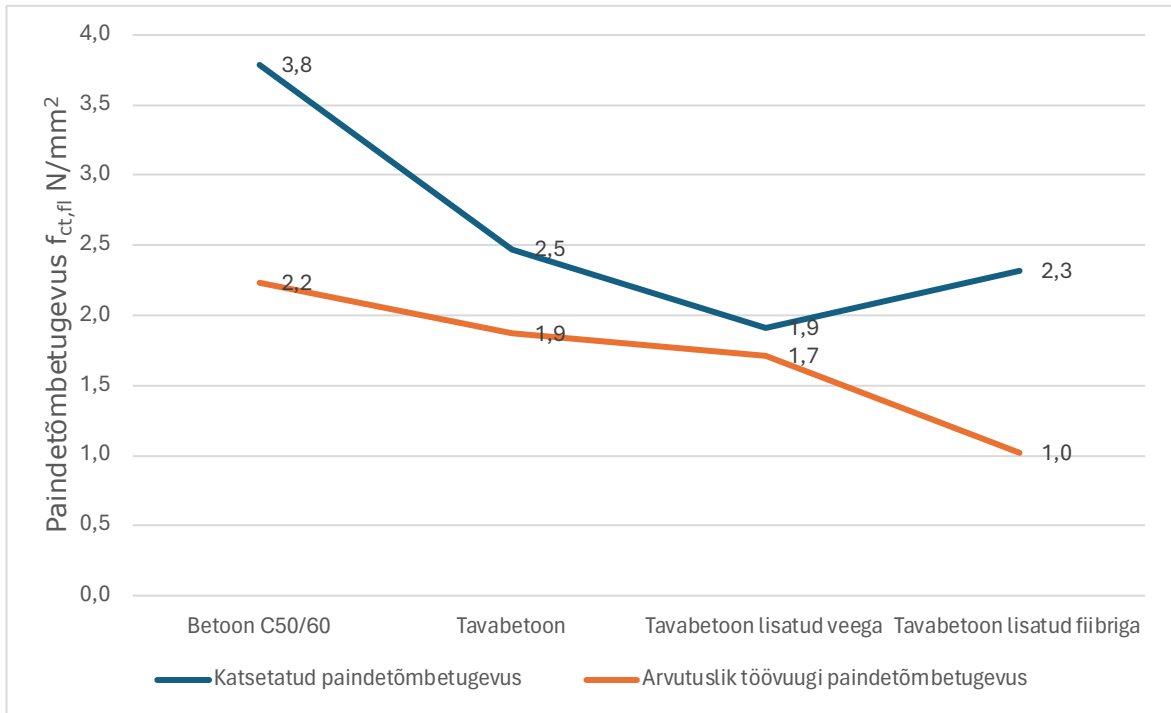
Joonis 25. Paindetõmbetugevuse, survetugevuse ja tiheduse omavaheline sõltuvus

Joonisel 25 on suurim paindetõmbetugevus suurima survetugevuse korral. Võrreldes betoon C50/60 katsekeha tavabetooniga katsekehaga, vähenes paindetõmbetugevus 52% ja survetugevus 42%. Tavabetooni katsekehal vähenes võrreldes tavabetoonile lisatud veega variandile paindetõmbetugevus 24% ja survetugevus 16%. Võrreldes tavabetooni katsekeha tavabetoonile lisatud fiibri variandiga, vähenes paindetõmbetugevus 8% ja survetugevus 70%. Antud juhul väheneb tiheduse langedes ka katsekehade survetugevus ja paindetõmbetugevus. See ei kehti ainult tavabetoonile lisatud fiibri korral, sest selle katsekeha puhul on tihedus ja survetugevus võrreldes teiste betoonidega kõige madalam, aga paindetõmbetugevus on suurem kui näiteks tavabetoonile lisatud veega katsekeha puhul.

Lisandeid kasutamata retseptide puhul oli paindetõmbetugevus keskmiselt 5% sama betoonisegu survetugevusest. Issa töös [16] oli erinevate betoonisegude korral paindetõmbetugevus keskmiselt 6% survetugevusest. Seega kinnitavad mõlema töö katsed, et paindetõmbetugevus võib töövuugi korral olla umbes 20 korda väiksem kui survetugevus.

Lisades tavabetooni retseptile vett ($v/t=0,72$), väheneb paindetõmbetugevus võrreldes tavabetooni ($v/t=0,64$) retseptiga 24%. Ephraimi töös selgus, et vesi-tsementteguri 0,7 katsekeha korral vähenes paindetõmbetugevus 15% võrreldes vesi-tsementteguri 0,6 katsekehaga. [19] Mõlemad tööd toetavad järeldust, et vesi-tsementteguri suurenemisel üle optimaalse piiri hakkab paindetõmbetugevus vähenema nii töövuugiga kui ka töövuugita olukorras.

Ka Statkauskase katsetes vähenes katsekeha paindetõmbetugevus polüpropüleenkiudu kasutades võrreldes selle mitte kasutamisega. Temal vähenes paindetõmbetugevus 22%, siin katses vähenes polüpropüleenkiudu kasutades katsekeha paindetõmbetugevus 6%. [23]



Joonis 26. Katsetatud ja arvutatud töövuugi paindetõmbetugevuse võrdlus

Joonisel 26 võrreldi C. A. Issa pakutud valemit töövuukide paindetõmbetugevuse väljaarvutamiseks. Mitte ühelgi juhul ei ole arvutuslik töövuugi paindetõmbetugevus suurem katseliselt saadud paindetõmbetugevusest, arvutusvalem on esitatud tagavara kasuks. Betooni C50/60 katsekeha puhul on katsetatud paindetõmbetugevus 42% suurem arvutuslikust tulemusest. Tavabetooni katsekeha puhul on katsetatud paindetõmbetugevus 24% suurem. Tavabetoonile lisatud veega katsekeha puhul on katsetatud paindetõmbetugevus 11% suurem. Tavabetoonile lisatud fiibriga katsekeha puhul on katsetatud paindetõmbetugevus 57% suurem. Keskmiselt on arvutuslik paindetõmbetugevus 34% väiksem, kui katselisel teel saadud paindetõmbetugevus. [16]

2.6 Soovitusi järgnevateks uurimistöodeks

Järgnevate sarnaste uurimistöode korra oleks huvipakkuv pikema fiibri kasutamine ja kindlasti tuleks valmistada ka ilma töövuugita katsekeha, kus betoonisegusse on lisatud fiibrit.

Asjakohane oleks katsekehasid kaaluda vormimise lõpus enne keskkonda minekut ja kaaluda uuesti enne teist betoonivalu. See on oluline, et teada saada vee väljakuivamise kogus.

Antud töös võrreldi erineva temperatuuriga kivistamise keskkondi 20 °C ja 60 °C juures, otstarbekas oleks uurida ka negatiivsete ja üle 60 °C kivistamiskeskkondade mõju töövuukide paindetõmbetugevusele. Lisaks oleks arukas uurida, millist mõju avaldavad paindetõmbetugevusele temperatuuri kõikumise tsüklid.

3. JÄRELDUSED

Töövuukide paindetõmbetugevust mõjutavad eelneva betoonivalu pinnatöötlus ja hooldus, kivistumistingimus, valamise viivitus ja betooni survetugevus. Töövuugid vähendavad katsekehade paindetõmbetugevust. Sama betoonisegu retsepti puhul on töövuugiga olukordades paindetõmbetugevus alati väiksem kui töövuugita olukorras.

1) Katsekehade töövuukide paindetõmbetugevus väheneb betoonivalu viivituse pikenemisega. Juba 4-tunnise valamisiivituse korral väheneb paindetõmbetugevus võrreldes töövuugita olukorraga.

- Kui katsekeha oli kaetud killega, siis paindetõmbetugevus vähenes 4-tunnise viivituse korral 3%, 18-tunnise viivituse korral 22% ja 7-päevase viivituse korral 31%.
- Kui katsekeha oli katmata 20 °C keskkonnas, siis 4-tunnise viivituse korral oli paindetõmbetugevus praktiliselt sama võrreldes töövuugita olukorraga, 18-tunnise viivituse korral vähenes kolmandiku võrra. 7-päevase viivituse korral jäi paindetõmbetugevus sisuliselt samaks kui 18-tunnise viivituse korral.
- Kui katsekehad olid katmata 60 °C keskkonnas, siis 4-tunnise viivituse korral vähenes paindetõmbetugevus 22% võrreldes töövuugita katsekehaga, 18-tunnise viivituse korral 38%, 7-päevase viivituse korral 97%.

2) Kivistumistemperatuuril jätkuvalu eel oli mõju töövuugi hilisemale paindetõmbetugevusele. 60 °C keskkonnas hoitud katsekehade paindetõmbetugevus vähenes võrreldes 20 °C juures hoitud katsekehadega.

- 4-tunnise betoonivalu viivituse korral andsid 20 °C keskkonnas (k.a niisutatud ja killega kaetud) kivistunud katsekehad sarnase paindetõmbetugevuse (3% väiksem kui töövuugita). 60 °C keskkonnas hoitud katsekehade paindetõmbetugevus vähenes neljandiku võrra. Seega kiiremal katsekehade kuivatamisel on väiksem katsekehade paindetõmbetugevus.
- 18-tunnise betoonivalu viivituse korral oli kile all kivistunud katsekeha paindetõmbetugevus viiendiku võrra parem, kui enne teist betoonivalu töövuugi pinda niisutades. 18-tunnise viivituse korral andsid enne

betonivalu niisutatud töövuugid kõige madalamad tulemused (40% madalam kui töövuugita olukorras).

- 7-päevase betoonivalu viivituse korral vähenes kivistumise temperatuuri tõstmisel katsekehade paindetõmbetugevus. 20 °C keskkonnas olnud katsekehade paindetõmbetugevust ei mõjutanud suurel määral see, kas katsekeha töövuugi pind oli kuiv, niisutatud või kile all kivistunud (vähenes 30% võrreldes töövuugita olukorraga)). 60 °C keskkonnas olnud katsekehadel mängis suurt rolli töövuugi pinna niisutamine enne teist betoonivalu. Niisutamata pinna korral vähenes paindetõmbetugevus 97%, niisutatud pinna puhul poole võrra võrreldes töövuugita olukorraga.

3) Erineval pinnatöötlusel ja hooldusel on erinev mõju katsekehade paindetõmbetugevusele.

- Paindetõmbetugevus oli kõige kõrgem teemantkettaga lihvitud pinna puhul (6% madalam kui töövuugita olukorras).
- Paindetõmbetugevus oli kõige väiksem olukorras, kus töövuugi pinnal oli suures koguses (5 mm kiht) tolmu (53% madalam kui töövuugita olukorras). Betoonivaluga jätkamisel on oluline töövuugi pind kindlasti puhastada. Selgus, et ka harjaga pühkides on võimalik paindetõmbetugevust parandada.

4) Enamikus olukordades ei suurendanud töövuugi pinna niisutamine enne teist betoonivalu paindetõmbetugevust, pigem vähendas seda.

- Võrreldes katsekeha töövuugi pindade niisutamise ja mitteniisutamise mõju paindetõmbetugevusele 60 °C keskkonnas kivistunud katsekehadel, siis ainuke olukord, kus niisutamine tõstis paindetõmbetugevust, oli 7-päevase betoonivalu viivituse korral, kus katsekeha oli jätkuvalu alguseks tõenäoliselt ulatuslikult välja kuivanud. 4-tunnise ja 18-tunnise valamisiivituse korral vähendas pinna niisutamine katsekehade paindetõmbetugevust 5% võrreldes niisutamata pinnaga.
- Võrreldes katsekeha töövuugi pindade niisutamise ja mitteniisutamise mõju paindetõmbetugevusele 20 °C keskkonnas kivistunud katsekehadel, siis 4-tunnise, 18-tunnise ega 7-päevase valamisiivituse

korral ei suurendanud töövuugi pinna niisutamine katsekehade paindetõmbetugevust.

- 5) Lisanditeta betoonisegudel suurenes paindetõmbetugevus survetugevuse suurenemisel.
- 6) Camille A. Issa pakutud töövuukide paindetõmbetugevuse valem $f_{ct,fl} = 0,28\sqrt{f_c}$ sobib uuritud betoonisegude töövuukide kirjeldamiseks. Sellega jäid tegelikud paindetõmbetugevused tagavara kasuks minimaalselt 11% ning keskmiselt 34% varuga.
- 7) Lisades betoonisegusse polüpropüleenfiibrit vähenes paindetõmbetugevus 8% võrreldes fiibrit lisamata olukorraga.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuritakse betooni töövuukide hoolduse ja pinnatöötuse mõjust paindetõmbetugevusele. Käsitatud on pinnatöötuse, betoonivalu viivituse ja kivistumistingimuse mõju proovikehade paindetõmbetugevusele. Paindetõmbetugevus määrati 4-punkti paindekatsel.

Katsetulemustest selgus, et töövuugi paindetõmbetugevus on väga tugevalt seotud valamisviivitusega. Mida pikemaks läheb valamisviivitus, seda enam paindetõmbetugevus väheneb. Ilma töövuugita etalonkehaga võrreldes vähenes 4-tunnise valamisviivituse korral paindetõmbetugevus 5%, 18-tunnise viivituse korral vähenes see neljandiku võrra ja 7-päevasel valamisviivitusel kolmandiku. 60 °C kivistumiskeskond vähendas katsekehade paindetõmbetugevust võrreldes 20-kraadises keskkonnas olnud katsekehade. Võrreldes erinevate pinnahoolduse ja pinnatöötuse viiside mõju paindetõmbetugevusele, saadi 20-kraadises keskkonnas ilma töövuugita etalonkehale kõige lähedasem paindetõmbetugevus teemantkettaga lihvides. Sellisel juhul oli töövuugiga katsekeha paindetõmbetugevus 6% madalam etalonkehast. Kõige väiksem paindetõmbetugevus oli 5-millimeetrise tolmuhiiga katsekehal, see oli pea poole nõrgem võrreldes etalonkehaga. Sellest tulenevalt on oluline betooni töövuugi tegemisel puhastada pind eelnevalt lahtisest materjalist ja tolmust.

Katsetulemused näitasid, et betoonisegudes, kus ei kasutatud lisandeid, on paindetõmbetugevus heas vastavuses survetugevusega. Erineva survetugevusega betooni retseptide paindetõmbetugevus moodustas keskmiselt 5% survetugevusest.

Võrreldes arvutuslikult (C. A. Issa valem [16]) saadud töövuugi paindetõmbetugevust katseliselt saadud paindetõmbetugevusega, saadi tulemuseks, et arvutuslikul teel saadud paindetõmbetugevus on tagavara kasuks minimaalselt 11% väiksem, aga keskmiselt kolmandiku võrra väiksem, kui katseliselt saadud paindetõmbetugevus.

Tööst järeldub, et töövuugi pinna niisutamine ei andnud paljudel juhtudel paremat paindetõmbetugevust. Vähe välja kuivanud katsekehade pinna niisutamine mõjutas paindetõmbetugevust negatiivselt kuni 9%. Kuid oluliselt välja kuivanud betooni mitteniisutamine enne valu jätkamist võib vähendada tugevust kuni 94%.

Märkimisväärne oli see, et töövuugilt enne betoonivalu harjaga ühe korra tolmu pühkides oli paindetõmbetugevus viiendiku võrra suurem kui 1-millimeetrise tolmuhihi puhul ja poole suurem kui 5-millimeetrise tolmuhiiga olukorra puhul.

SUMMARY

This thesis provides an overview of the effect of curing and surface treatment on the flexural strength of concrete joints. The influence of surface treatment, concrete casting delay, and curing conditions on the flexural tensile strength of specimens is discussed. Flexural tensile strength was determined through a 4-point bending test.

The test results revealed that the flexural tensile strength of the joint is strongly correlated with the casting delay. The shorter the casting delay, the greater the flexural tensile strength. Compared to the reference specimen without a construction joint, with a casting delay of 4 hours, the flexural tensile strength decreased by 5%, with an 18-hour delay it decreased by a quarter, and with a 7-day delay it decreased by a third. The curing environment at 60°C reduced the flexural strength compared to specimens kept at 20°C. Among different surface maintenance and treatment methods, the closest flexural tensile strength to the reference specimen without a construction joint, at 20°C, was achieved by diamond grinding, in which case the flexural strength of the specimen with joint was 9% lower than that of the reference specimen. The lowest flexural tensile strength was observed in specimens with a 5 mm dust layer, which was nearly half as strong as the reference specimen without the construction joint. Therefore, it is important to clean the previous surface from loose material and dust when making concrete joints.

The test results indicated that in concrete mixes without additives, the flexural strength is in correlation with compressive strength. The flexural strength of concrete mixtures with varying compressive strengths averaged 5% of the compressive strength. Comparing the flexural tensile strength calculated with the formula (using C. A. Issa's formula [16]) and with the experimentally obtained flexural strength, it was found that the calculated flexural tensile strength is minimally 11% smaller, but on average a third smaller than the experimentally obtained flexural strength.

In most cases, moistening the construction joint surface did not improve the flexural strength. Moistening the surface of slightly dried specimens negatively affected the flexural strength by up to 9%. However, the specimen that was almost completely dried before resuming casting can reduce flexural strength by up to 94%.

It was notable that brushing the dust off the construction joint surface once before casting concrete resulted in a flexural strength about 20% higher than in the case of a 1 mm dust layer and twice as high as in the case of a 5 mm dust layer.

In this thesis, different curing environments at temperatures of 20 °C and 60 °C were compared. It would be suggested also to investigate the effect of curing in negative temperatures and environments above 60 °C and what effect these will have on the flexural tensile strength of construction joints. Additionally, it would be prudent to examine the impact of temperature fluctuation cycles on flexural tensile strength.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. EVS-EN 13670:2010
2. Common Concrete Construction Mistakes at Site and How to avoid it? [Võrguväljaanne] <https://theconstructor.org/concrete/common-concrete-construction-mistakes-site-avoid/7233/> (18.04.2024)
3. Common mistakes made when installing concrete [Võrguväljaanne] <https://www.polishtheplanet.com/blog/article/common-mistakes-made-when-installing-concrete> (24.04.2024)
4. Betoneerimisjuhend [Võrguväljaanne] <https://rudus.ee/betoon/betoneerimisjuhend/> (11.04.2024)
5. The importance of construction joints in concrete construction, T. Chang, november 2023 [Võrguväljaanne] <https://vertexeng.com/insights/need-to-know-the-importance-of-construction-joints-in-concrete-construction/> (12.04.2024)
6. EVS-EN 206:2014+A2:2021
7. Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete, C. Chhorn, S. J. Hong, S. W. Lee, mai 2018
8. EVS-EN 12390-5:2019
9. A. Klauson, J. Metsaveer, P. Põdra, U. Raukas, *Tugevusõpetus*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012.
10. Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens, P. R. G. Hein, L. Brancheriau, juuli 2018
11. Differences Between Three Point and Four Point Bending Tests, L. Novotny, oktoober 2023
12. On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests, F. Mujika oktoober 2005
13. Statistical evaluation of three and four-point bending tests of FRC, A. Podstawka, M. Foglar, V. Kristek, mai 2015
14. Empirical relationships between compressive and flexural strength of concrete containing recycled asphalt material for pavement applications using different specimen configurations, C.R. Marin-Urbe, R. Navarro-Gaete, mai 2021
15. Evaluating the co-relationship between concrete flexural tensile strength and compressive strength, M. Ahmed, K. M. E. Hadi, M. A. Hasan, J. Mallick, A. Ahmed, 2014
16. The effect of concrete vertical construction joints on the modulus of rupture, C. A. Issa, N. N. Gerges, S. Fawaz, detsember 2013
17. Materials and Design data, A. W. Beeby, R. S. Narayanan, and H. Gulvanessian, jaanuar 2005
18. Effects of water-cement ratio and notches to the flexural strength of concrete, M. S. A. Shah, 2020
19. Effects of Water-Cement Ratio on The Strength of Concrete with Laterite Rock Course Aggregate, M. e. Ephraim, E. A. Adoga, E. O. Rowland-Lato, November 2019
20. Effect of Aggregate Size on Strength Characteristics of High Strength Lightweight Concrete, H. Wei, Y. Liu, T. Wu, X. Liu, märts 2020
21. Effect of Coarse Aggregate Size on the Compressive Strength and the Flexural Strength of Concrete Beam, S. O. Ajamu, J. A. Ige, jaanuar 2015
22. Influence of additives on flexural strength of concrete, S. Tolmachov, O. Belichenko, D. Zakharov

23. Investigation of Concrete Shrinkage Reducing Additives, M. Statkauskas, A. Grinys, D. Vaiciukyniene, mai 2022
24. A study of factors affecting the flexural tensile strength of concrete, Mohd. Ahmed, Javed Mallick, Mohd. Abul Hasan, aprill 2014
25. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete, Metin Husem, detsember 2005
26. Effects of Low Temperatures on Flexural Strength of Macro-Synthetic Fiber Reinforced Concrete: Experimental and Numerical Investigation, S. Aidarov, A. Nogales, i. Reynvart, N. Tošic, A. de la Fuente, veebruar 2022
27. Toimivusdeklaratsioon Nr 1325-CPR-1410 Schwenk 19, aprill 2019
28. K. K. Kar, *Handbook of Fly Ash*, 2022 Elsevier Inc
29. EVS-EN 12390-3:2019
30. EVS-EN 12390-7:2019
31. EVS-EN 12350-2:2019
32. EVS-EN 1008:2002 28
33. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete, S. N. Shoukrt, G.W. William, B. Downie, M. Y. Riad, august 2010
34. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, C. Ishee, S. Surana, 2019
35. Concrete-to-concrete bond Strength: A review, M. el Afandi, S. Yehia, T. Landolsi, N. Qaddoumi, M. Elchalakani, november 2022
36. Experimental study on the flexural properties of repaired concrete with super early strength under low-velocity impacts, F. Yang, H. Gai, J. Li, W. Feng, J. Mai, Y. Yang, märts 2024
37. Experimental Study of the Dynamic Flexural Strength of Concrete, X. Regal, J-L. Hanus, detsember 2016
38. Effects of cold joint and its direction on the compressive and flexural strength of concrete, B. C. Zega, H. Prayuda, F. Monika, F. Saleh, juuni 2021
39. Experimental Investigation of the Effect of Cold Joint on Strength and Durability of Concrete, I. B. Kara, veebruar 2021
40. Fracture performance and fracture characteristics of concrete members with cold joints: Numerical simulation, H.-S. Deng, H.-L. Fu, H. Li, Y. Shi, Z. Huang, märts 2023
41. The impact of the water - to - cement ratio on the surface morphology of cementitious materials, E. Chuta, J. Colin, J. Jeong, august 2020
42. Characterization Methods for Ultrathin Wafer and Die Quality: A Review, M. R. Marks, Z. Hassan, K. Y. Cheong, detsember 2014

LISA 1.

Lisa 1. Katsetuste tulemused

Valamine											Katsekehade katsetamine					
Jrk . nr	Katsekeha pinnatöötlus	Kivistumine	Niisutamine	Valamise viivitus	Kivistumine 28 p	Betooni tüüp	d, m	h, m	L=3,5 d	V, m ²	Valamis lõppkuupäev	Mass õhus ; g	Mass peale katset , g	Purustav jõud survel, kN	Paind-tõmbetugevus, MPa	Keskmine paind-tõmbetugevus, MPa
	Segu tugevuse näitamiseks			-	20 °C vees	Tavabetoon	100	100	100	0,0010						
	Segu tugevuse näitamiseks			-	20 °C vees	Tavabetoon lisatud veega	100	100	100	0,0010						
	Segu tugevuse näitamiseks			-	20 °C vees	Tavaebetoon lisatud fiibriga	100	100	100	0,0010						
	Segu tugevuse näitamiseks			-	20 °C vees	C50/60	100	100	100	0,0010						
1		20 °C kaetud		4h	20 °C vees	Tavabetoon	100	101	352	0,0036	20.03.2024	8479	8469	10,249		3,0
							101	102	352	0,0036	20.03.2024	8454	8442	10,788		3,1
							101	102	350	0,0036	20.03.2024	8431	8424	10,954		3,1
2		20 °C kaetud		18h	20 °C vees	Tavabetoon	102	101	352	0,0036	06.03.2024	8702	8697	8,017		2,3
							101	99	352	0,0035	06.03.2024	8618	8614	7,763		2,4
							100	102	355	0,0036	06.03.2024	8680	8675	9,525		2,7
3		20 °C kaetud		18h	20 °C vees	Tavabetoon lisatud veega	104	102	352	0,0037	02.04.2024	8423	8417	5,923		1,6
							101	102	352	0,0036	02.04.2024	8270	8264	6,132		1,8
							102	102	352	0,0037	02.04.2024	8376	8371	8,238		2,3
4	Kelluga silutud	20 °C kaetud		18h	20 °C vees	Tavabetoon lisatud fiibriga	102	102	351	0,0037	02.04.2024	7982	7970	8,441		2,4
							103	102	351	0,0037	02.04.2024	8013	7998	9,051		2,5
							102	101	352	0,0036	02.04.2024	8135	8125	7,032		2,0
5		20 °C kaetud		18h	20 °C vees	C50/60	102	101	352	0,0036	02.04.2024	8706	8700	11,491		3,3
							102	100	351	0,0036	02.04.2024	8743	8736	12,971		3,8
							102	101	352	0,0036	02.04.2024	8624	8617	14,628		4,2
6		20 °C kaetud		7p	20 °C vees	Tavabetoon	101	102	352	0,0036	01.03.2024	8651	8648	7,872		2,2
							100	102	352	0,0036	01.03.2024	8657	8654	8,611		2,5
							102	101	351	0,0036	01.03.2024	8544	8543	6,44		1,9
7		20 °C		4h	20 °C vees	Tavabetoon	100	101	352	0,0036	20.03.2024	8576	8569	9,892		2,9
							102	102	351	0,0037	20.03.2024	8565	8558	10,773		3,0
							102	101	350	0,0036	20.03.2024	8507	8501	12,16		3,5
8		20 °C		18h	20 °C vees	Tavabetoon	100	101	352	0,0036	06.03.2024	8719	8715	7,17		2,1
							100	101	351	0,0035	06.03.2024	8602	8598	6,586		1,9
							100	102	351	0,0036	06.03.2024	8621	8616	8,897		2,6

Jrk. nr	Katsekeha pinnatöötlus	Kivistumine	Niisutamine	Valamise viivitus	Kivistumine 28 p	Betooni survetugevusklass	d, mm	h, mm	L=3,5d	V, m ²	Valamis lõppkuupäev	Mass õhus; g	Mass peale katset, g	Purustav jõud survel, kN	Paind-tõmbetugevus, MPa	Keskmine paind-tõmbetugevus, MPa
9	Kelluga silutud	20 °C		7p	20 °C vees	Tavabetoon	100	100	352	0,0035	01.03.2024	8516	8515	7,502	2,3	2,29
							101	100	351	0,0035	01.03.2024	8541	8538	6,443	1,9	
							100	102	351	0,0036	01.03.2024	8623	8619	9,395	2,7	
10		20 °C	niisutatud	4h	20 °C vees	Tavabetoon	101	100	352	0,0036	20.03.2024	8676	8668	10,773	3,2	3,08
							101	102	350	0,0036	20.03.2024	8616	8606	10,557	3,0	
							103	102	352	0,0037	20.03.2024	8585	8577	10,834	3,0	
11		20 °C	niisutatud	18h	20 °C vees	Tavabetoon	101	100	352	0,0036	06.03.2024	8495	8493	6,097	1,8	2,01
							100	102	351	0,0036	06.03.2024	8680	8678	9,595	2,8	
							101	102	351	0,0036	06.03.2024	8652	8647	5,129	1,5	
12		20 °C	niisutatud	7p	20 °C vees	Tavabetoon	101	100	352	0,0036	18.03.2024	8725	8709	6,824	2,0	2,29
							101	101	352	0,0036	18.03.2024	8734	8723	7,982	2,3	
							102	102	352	0,0037	18.03.2024	8602	8590	8,95	2,5	
13		60 °C kuivatuskapp		4h	20 °C vees	Tavabetoon	101	101	352	0,0036	20.03.2024	8572	8563	9,491	2,8	2,52
							101	101	352	0,0036	20.03.2024	8509	8498	8,304	2,4	
							102	102	351	0,0037	20.03.2024	8516	8504	8,374	2,4	
14		60 °C kuivatuskapp		18h	20 °C vees	Tavabetoon	100	101	350	0,0035	06.03.2024	8585	8580	6,176	1,8	2,05
							101	101	351	0,0036	06.03.2024	8496	8491	6,9	2,0	
							101	102	350	0,0036	06.03.2024	8602	8597	8,138	2,3	
15	60 °C kuivatuskapp		7p	20 °C vees	Tavabetoon	100	101	351	0,0035	18.03.2024	8625	8621	1,021	0,3	0,10	
									0,0000	18.03.2024			0	0,0		
									0,0000	18.03.2024			0	0,0		
16	60 °C kuivatuskapp	niisutatud	4h	20 °C vees	Tavabetoon	103	101	352	0,0037	20.03.2024	8576	8568	7,903	2,3	2,41	
						100	102	351	0,0036	20.03.2024	8583	8577	9,604	2,8		
						101	102	352	0,0036	20.03.2024	8500	8492	7,676	2,2		
17	60 °C kuivatuskapp	niisutatud	18h	20 °C vees	Tavabetoon	101	99	352	0,0035	06.03.2024	8589	8586	7,572	2,3	1,91	
						102	100	352	0,0036	06.03.2024	8581	8578	4,791	1,4		
						101	101	351	0,0036	06.03.2024	8585	8582	6,996	2,0		
18	60 °C kuivatuskapp	niisutatud	7p	20 °C vees	Tavabetoon	101	100	351	0,0035	18.03.2024	8751	8735	4,861	1,4	1,64	
						101	101	352	0,0036	18.03.2024	8681	8672	6,548	1,9		
						100	102	352	0,0036	18.03.2024	8635	8622	5,426	1,6		

Jrk. nr	Katsekeha pinnatöötlus	Kivistumine	Niisutamine	Valamise viivitus	Kivistumine 28 p	Betooni survetugevusklass	d, mm	h, mm	L=3,5d	V, m ²	Valamis lõppkuupäev	Mass õhus; g	Mass peale katset, g	Purustav jõud survel, kN	Paind-tõmbetugevus, MPa	Keskmine paind-tõmbetugevus, MPa
19	Silumata	20 °C		7p	20 °C vees	Tavabetoon	100	100	350	0,0035	01.03.2024	8649	8648	5,838	1,8	2,06
							101	101	351	0,0036	01.03.2024	8622	8621	8,357	2,4	
							102	100	350	0,0036	01.03.2024	8557	8556	6,813	2,0	
20		20 °C	niisutatud	7p	20 °C vees	Tavabetoon	100	100	350	0,0035	18.03.2024	8609	8600	8,262	2,5	2,24
							100	102	352	0,0036	18.03.2024	8680	8671	7,362	2,1	
							100	101	352	0,0036	18.03.2024	8674	8667	7,153	2,1	
21	Teemantkettaga lihvitud	20 °C		7p	20 °C vees	Tavabetoon	101	102	352	0,0036	18.03.2024	8678	8667	10,502	3,0	2,92
							101	100	351	0,0035	18.03.2024	8686	8681	10,277	3,1	
							101	101	352	0,0036	18.03.2024	8580	8569	9,737	2,8	
22		20 °C	niisutatud	7p	20 °C vees	Tavabetoon	101	100	352	0,0036	25.03.2024	8619	8609	8,592	2,6	2,44
							101	101	352	0,0036	25.03.2024	8556	8548	7,694	2,2	
							100	102	350	0,0036	25.03.2024	8670	8663	8,775	2,5	
23	Lihvimise tolmu	20 °C		7p	20 °C vees	Tavabetoon	103	102	351	0,0037	25.03.2024	8604	8596	8,609	2,4	2,30
							103	102	351	0,0037	25.03.2024	8666	8658	7,557	2,1	
							101	102	351	0,0036	25.03.2024	8603	8596	8,313	2,4	
24		20 °C		7p	20 °C vees	Tavabetoon	101	102	352	0,0036	25.03.2024	8638	8627	5,661	1,6	1,47
							101	100	352	0,0036	25.03.2024	8620	8610	5,199	1,5	
							101	101	352	0,0036	25.03.2024	8637	8628	4,3	1,3	
25	harjaga pühitud (1x)	20 °C		7p	20 °C vees	Tavabetoon	103	102	352	0,0037	25.03.2024	8688	8683	11,471	3,2	2,87
							102	102	350	0,0036	25.03.2024	8497	8490	8,659	2,4	
							103	101	351	0,0037	25.03.2024	8614	8604	10,311	2,9	
26	Fiibri pudistamine pinnale	20 °C		7p	20 °C vees	Tavabetoon	103	103	349	0,0037	25.03.2024	8617	8607	6,15	1,7	1,76
							102	102	352	0,0037	25.03.2024	8704	8694	5,993	1,7	
							101	102	352	0,0036	25.03.2024	8569	8563	6,664	1,9	
27	Monoliitne	20 °C vees		0	20 °C vees	Tavabetoon	103	102	350	0,0037	02.04.2024	8558	8547	11,4	3,2	3,24
							103	101	351	0,0037	02.04.2024	8459	8452	11,331	3,2	
							103	102	352	0,0037	02.04.2024	8473	8465	11,741	3,3	