



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**KOORMAMISE SUUNA JA
KIVISTUMISKESKKONNA MÕJU 3D PRINDITUD
BETOONI TUGEVUSELE**

The Impact of Loading Direction and Curing Environment on
the Strength of 3D Printed Concrete

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Tammkõrv

Üliõpilaskood 144580

Juhendaja: Mattias Põldaru

Tallinn 2022

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.

21. november 2022

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

21. november 2022

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

detsember 2022

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, Karl Tammkõrv,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
**KOORMAMISE SUUNA JA KIVISTUMISKESKKONNA MÕJU 3D PRINDITUD
BETOONI TUGEVUSELE,**

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.
-

21.11.2022

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



Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **KARL TAMMKÕRV**

Üliõpilaskood **144580**

Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**
Peaeriala: Ehitustehnika

Lõputöö teema:

KOORMAMISE SUUNA JA KIVISTUMISKESKKONNA MÕJU 3D PRINDITUD BETOONI TUGEVUSELE

The Impact of Curing Conditions on the Strength and Porosity of 3D Printed Concrete

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. Selgitada välja kivistumistingimuste mõju prinditud betooni tugevusele
2. Selgitada välja pumpamiseelse tihendamise mõju prinditud betooni veeimavusele

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Mujal olemasolevate katsetulemuste läbitöötamine ja esitamine	07.10.2020
2. Katseseeriade lõpp	21.10.2022
3. Katseandmete töötlus ja analüüs	28.10.2022
4. Lõputöö 95% ülevaatus	14.11.2022
5. Lõputöö esitamine	21.11.2022
Kokkuvõtte eesti keeles	
Kokkuvõtte inglise keeles	

Lõputööde 95% ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

14.11.2021

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

Kirjeldus	Tähtaeg
1	
2	
3	
4	
5	

Lõputöö esitamise tähtaeg:

28. november 2022

Lõputöö ülesanne välja antud: 12.09.2022

Juhendaja: Mattias Põldaru

Ülesande vastu võtnud: Karl Tammkõrv

Avalikustamise
piirangu tingimused: puuduvad

SISUKORD

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	3
SISUKORD	6
EESSÕNA.....	8
SISSEJUHATUS	9
1. TEOREETILINE OSA	10
1.1 Printbetoonide koostis.....	10
1.1.1 Kivistumiskeskonna mõju betooni tugevusnäitajatele.....	11
1.2 3D prinditud betoon.....	12
1.2.1 Üldiselt betooni printimisest.....	12
1.2.2 3D prinditud betooni uurimise vajadus.....	15
1.2.3 Vormi valatud betooni erinevus 3D prinditud betoonist	16
1.2.4 Prinditud betooni katsetamise võimalused	17
1.3 Varasemalt tehtud katsed ja uuringud 3D prinditud betooniga.....	18
1.3.1 Tugevuslik erinevus prinditud ja vormis valmistatud betoonkehade vahel.....	19
1.3.2 Prinditud betooni katsetamise suuna mõju katsetulemusele	24
1.3.3 Prinditud betoonide kihtide vaheline nake	28
1.3.4 Veeimavus prinditud betoonides	30
2. KATSELINE OSA.....	33
2.1 Katseplaan.....	33
2.2 Katsete meetodika	34
2.2.1 Kasutatud katsematerjalid	34
2.2.2 Kasutatud tööriistad ja seadmed	37
2.2.3 Printimiskeskonna kirjeldus ja seadmete parameetrid	38
2.2.4 Printimise protsessi kirjeldus	39
2.2.5 Katsekehade kivistumistingimused	40
2.2.6 Katsekuubikute välja löikamine.....	41
2.2.7 Katsekehade ette valmistamine purustamiseks.....	42
2.2.8 Surve-, painde-, lõhestus- ja väljatõmbe katse meetodika	43
2.2.9 Katsekehade veeimavuse määramine.....	50
2.3 Tugevusnäitajate määramiseks kasutatavad valemid.....	51
3. KATSETULEMUSED	53
3.1 Katsekehade suundade ja piirkondade kirjeldus.....	53

3.2	3D prinditud betoonist väljalõigatud katsekehade katsetulemused	56
3.2.1	I Katseseeria survekatse tulemused	56
3.2.2	I ja II katseseeria veeimavuse määramise tulemused	57
3.2.3	II katseseeria survekatse tulemused	58
3.2.4	II katseseeria paindetõmbekatse tulemused	62
3.2.5	II katseseeria lõhestustõmbekatse tulemused	64
3.2.6	II katseseeria väljatõmbekatse tulemused	67
3.3	Katse piltide analüüs	69
3.4	Järeldused	74
	SUMMARY	76
	KASUTATUD KIRJANDUS	78
	LISAD	80
	Lisa 1 Varasemate tehtud uuringute tulemused	80
	Lisa 2 Katsetulemused	82

EESSÕNA

Lõputöö teema pakkus välja lektor Tanel Tuisk. Lõputöö teema sai detailsemalt sõnastatud koostöös doktorant Mattias Põldaruga. Töö koostati Tallinna Tehnikaülikoolis (edaspidi TTÜ). Katseline osa teostati TTÜ Mäepealse laboris. Abiks lõputöö valmimisele olid Tanel Tuisk ja Mattias Põldaru.

Lõputööga lisaks aitas kaasa ka Jürgen Tammepärg.

Võtmesõnad: betoon, 3D printimine, kivistumine, keskkond, magistritöö

SISSEJUHATUS

Antud magistritöö on jätkuks Mihkel Pogga lõputööle "3D printimisbetooni koostise alusuuring", mille põhjal on valitud segude koostis.

Lõputöö on jaotatud kaheks osaks. Teoreetiline osa, kus käsitletakse varasemat kirjandust. Katseline osa, kus käsitletakse katsemetoodikat, tulemusi ning nende tulemuste analüüsi.

Teoreetilises osas käsitletakse 3D printimise tehnoloogiaid ja printimise meetodeid. Betooni kivistumist mõjutavaid tegureid ning nende tegurite mõju tugevusele. Uuritakse varasemalt tehtud katseid prinditud betoonidega ning analüüsitakse nende tulemusi. Täiendavalt võrreldakse varasemalt tehtud uurimuste põhjal 3D prinditud betooni ja vormi valatud betoonide vahelisi omadusi.

Katseline osa on omakorda tehtud kahes osas. Esimeses osas uuritakse 3D prinditud betooni katsekehade tugevuse kasvu ja erinevust erinevas vanuses, võrreldakse tugevusnäitajaid kahes erinevas keskkonnas kivistunud katsekehadel. Katsekehad on valmistatud samast segust, aga on peale printimist jäetud kivinema erinevatesse keskkondadesse. Ühel juhul jäetakse katsekehad kivinema tava toakeskkonda, kus vee välja liikumine betoonist ei ole takistatud. Teisel juhul kaetakse katsekehad kilega ja niisutatakse regulaarselt, ehk hooldatud keskkond, kus vee välja liikumine betoonist on takistatud.

Katse teises osas viidi hooldatud keskkonnas kivilinenud katsekehadega läbi katseid. Katsed viidi läbi selliselt, kus prinditud betooni testiti survele, paindele, lõhestumisele ja tõmbele. Kõik katsed viidi läbi selliselt, et katsekehasid koormati erinevatest suundadest.

Katselisele osale järgneb ka pildianalüüs purunenud katsekehadest.

1. TEOREETILINE OSA

1.1 Printbetoonide koostis

Täitematerjalid moodustavad tavaliselt betooni või mördi massist kuni 70% ning moodustavad mördi skeleti, mida seob hüdraatunud sideaine. Peentäitematerjalina kasutatakse tavaliselt kvartsliiva, mis võib olla mägiliiv (karjäärast) või jõeliiv (ka mereliiv). [1]

Mägiliiv on nurgelise aga jõeliiv sileda pinnaga, sest vee liikumisest põhjustatud erosioon lihvib veekogudes liivaosakesi. Mägiliiva nurgelisus muudab saadava mördi tugevamaks, sest sideaine saab nurgelisuse tõttu teradega paremini nakkuda, kuid jõeliiv parandab seevastu töödeldavust, sest osakeste vahel on vähem hõõrdumist. Varasemalt on kasutatud TTÜs läbi viidud printbetooni katsete puhul mägiliiva, kuna betooni printimises kasutatava mördi soovitatavate omaduste hulka kuulub kjuhoidvus. [1, 16]

Täitematerjali kasutatakse nii materjali maksumuse kui ka mahukahanemiste vähendamiseks, ning kehtib reegel, et mida peenem on täitematerjal, seda rohkem sideainet kulub kõigi osakeste katmiseks, mis omakorda suurendab mahukahanemisi. [16]

Standardi EVS-EN 197-1 kohaselt on tsement sideaine, mis veega segatult moodustab hüdratatsiooni tagajärjel tarduva ja kivineva massi, mis säilitab pärast kivinemist oma omadused ka vee all. [17]

Tsemendi ülesanne on siduda mördi skeletis olevad täitematerjalid, mitte mängida põhilist rolli kandevõime saavutamisel. Seda selle pärast, et esiteks on tsement täitematerjalist oluliselt kallim, ning teiseks toimub tsemendi kivinemisel ja kuivamisel suhteliselt suur mahukahanemine, mis põhjustab konstruktsioonis pragusid. [16]

Standardi EVS-EN 206 järgi on betoon materjal, mis saadakse omavahel segatud tsemendist, jäme- ja peentäitematerjalist ja veest, millele võib lisada või mitte lisada keemilisi ja peenlisandeid või kiudu ja mille omadused kujunevad tsemendi hüdratatsiooni tulemusena. [15]

Kuna käsitletavas uurimustöös betooni printimisel ei kasutata jämetäitematerjale, siis võib järeldada, et antud betooni printimise juures on prinditav materjal pigem mört kui betoon.

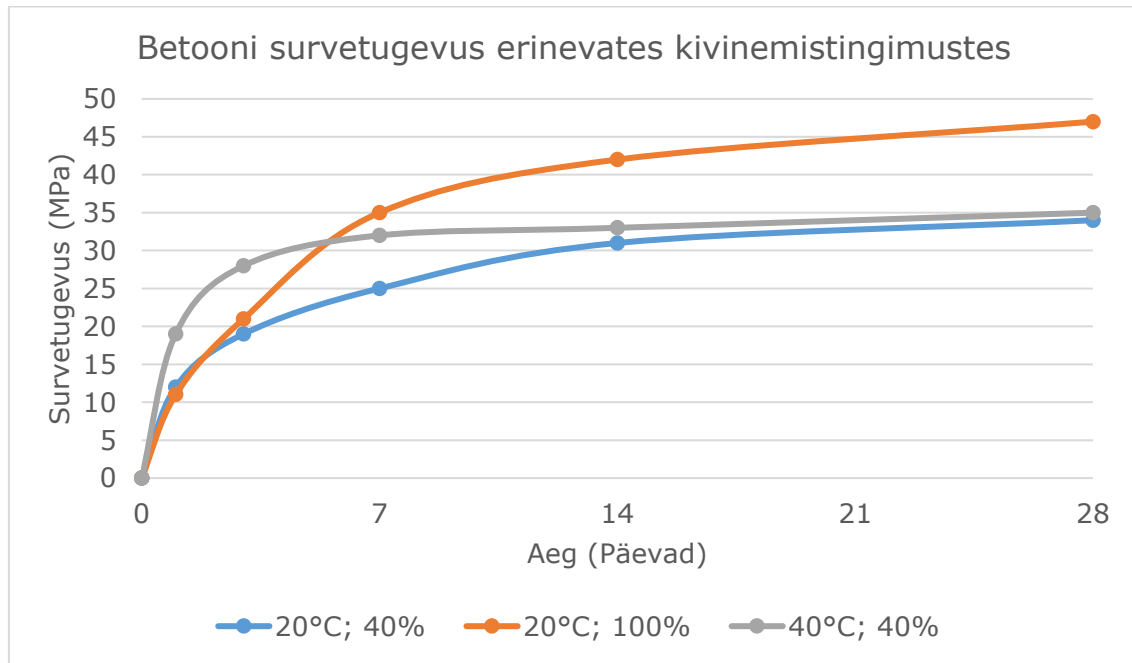
1.1.1 Kivistumiskeskkonna mõju betooni tugevusnäitajatele

Myongji Ülikoolis, Chungnami Rahvuslikus Ülikoolis ja Korea Ehitustehnoloogia Instituudis on läbi viinud uuringuid, kus uuriti kuidas temperatuur ja õhuniiskus betooni kivinemisprotsessil mõjutab betooni tugevusnäitajaid. Antud uurimused viidi läbi betoonidega, mida kasutatakse tihti tuumaelektrijaamade rajamisel. Katsed tehti kolme erineva seguga, kus deklareeritavad tugevused olid 41,2 MPa, 31,0 MPa ja 27,6 MPa. Sisuline erinevus segudel esines tsemendi ja tuha osakaalus. Täpsemat infot segude ja katsetulemuste kohta on võimalik näha lisade peatüki alt tabelis L1.1 ja L1.2. Segusid testiti erinevatel temperatuuridel vahemikus 10°C kuni 40°C ja õhuniiskustel vahemikus 40% kuni 100%. Joonisel 1.1 on esitatud betooni tugevusnäitajate kasv erinevas vanuses sõltuvalt kivinemistingimustest. [11]

Antud uuringus tuli välja, et suurema temperatuuri käes kivilinenud katsekehad saavutavad küll esimese 3 päevaga kiiremini suuremad tugevusnäitajad kui seda on jahedamas keskkonnas kivilinev betoon. Sellegipoolest 28 päeva vanuselt olid kõige suuremate tugevusnäitajatega katsekehad, mis olid kivilinenud keskkonnas, kus õhuniiskus oli 100%. [11]

Täiendavalt on läbi viidud uuringuid Shenzheni Ülikoolis ja Chalmersi Tehnikaülikoolis, kus jäeti kivilinema erineva õhuniiskusega keskkondadesse. Ilmnes, et niiske keskkond mõjutab vee välja liikumist betooni seest, millel on omakorda suur mõju betooni vastupidavusele. [12]

Antud uurimuste tulemuste analüüsi käigus võib järeldada, et temperatuuril ja suhtelisel õhuniiskusel on suur mõju betooni kivilinemisele ja selle lõplikele tugevusnäitajatele. Lisaks sellele on antud katsetest võimalik välja lugeda, et tugevusnäitajaid mõjutab väga palju ka kuivsegu koostis, tsemendi ja täitematerjalide mõju tugevusele on märkimisväärne.



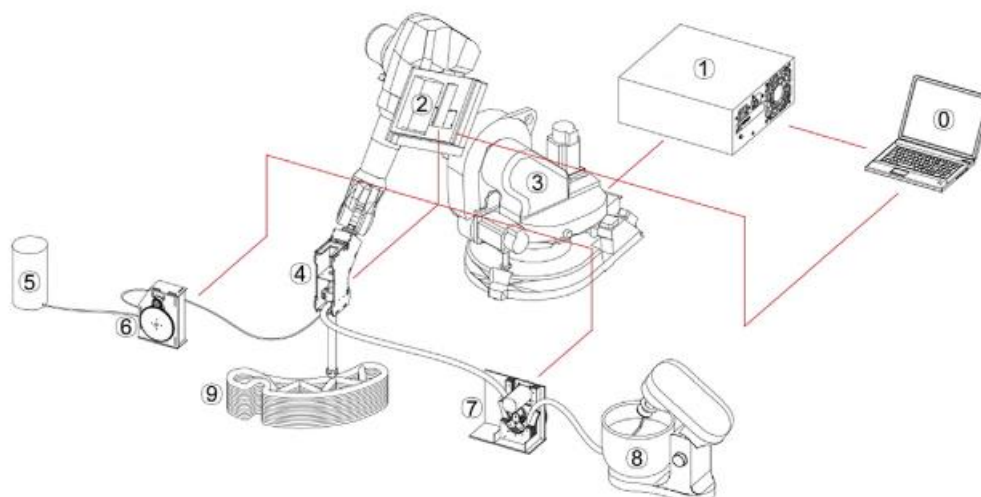
Joonis 1.1 Betooni survetugevused erinevates kivinemistingimustes [12]

1.2 3D prinditud betoon

1.2.1 Üldiselt betooni printimisest

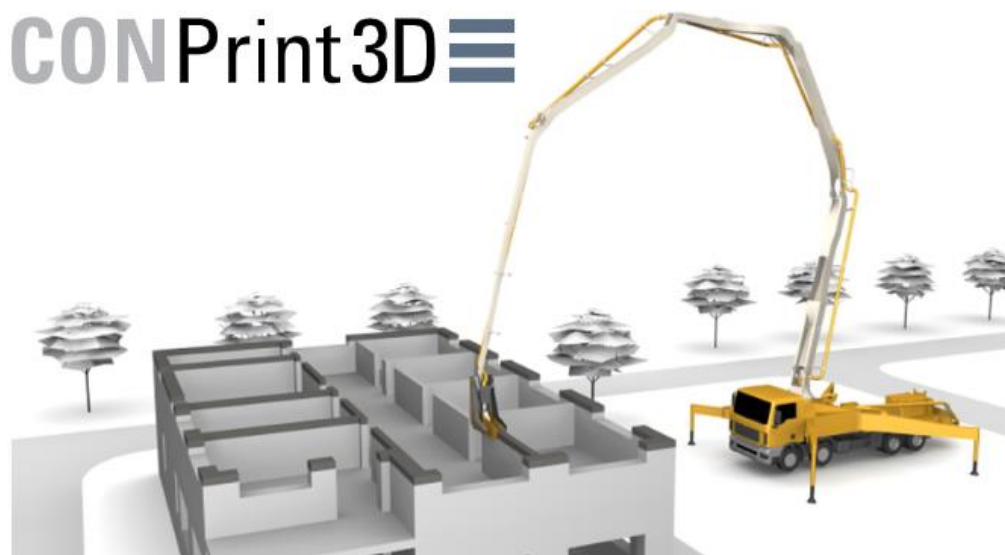
Viimastel aastakümnetel on digitaliseerimine ning infotehnoloogia areng maailmas teinud väga suuri samme. Sellega seoses on hakatud ehitusvaldkonnas uurima võimalusi, kuidas rakendada seda arengut ka ehitusprotsesside automatiseerimisel.

Üks sellistest võimalustest on betooni 3D printimine, mis kaasab ehitustarkvarad ja automaatika ehitusplatsile. Betooni printimine on mitmeti sarnane kõige levinumate kihtide lisamise teel töötavate plasti 3D printeritega. Esiteks on vaja määrata printimisala piirkond koordinaatteljestikuga. Teiseks on tarvis materjali, mida masinale ette sööta. Kolmandaks oleks vaja seadet, mis hakkab materjali läbi toru otsikuni liigutama. Neljandaks on vajalik kindla läbimõõdu, kuju ja paigutusega otsikuid, millest materjal ekstrudeeritakse, viiendaks on vaja masinaid ja tarkvara, mille kaudu saab reguleerida materjali pumpamise kogust ja printimisaparaadi otsiku liikumise suunda ja kiirust 3D ruumis. Joonisel 1.2 on täpsemalt kirjeldatud, millest koosneb 3D betooniprinteri ahel. [3]

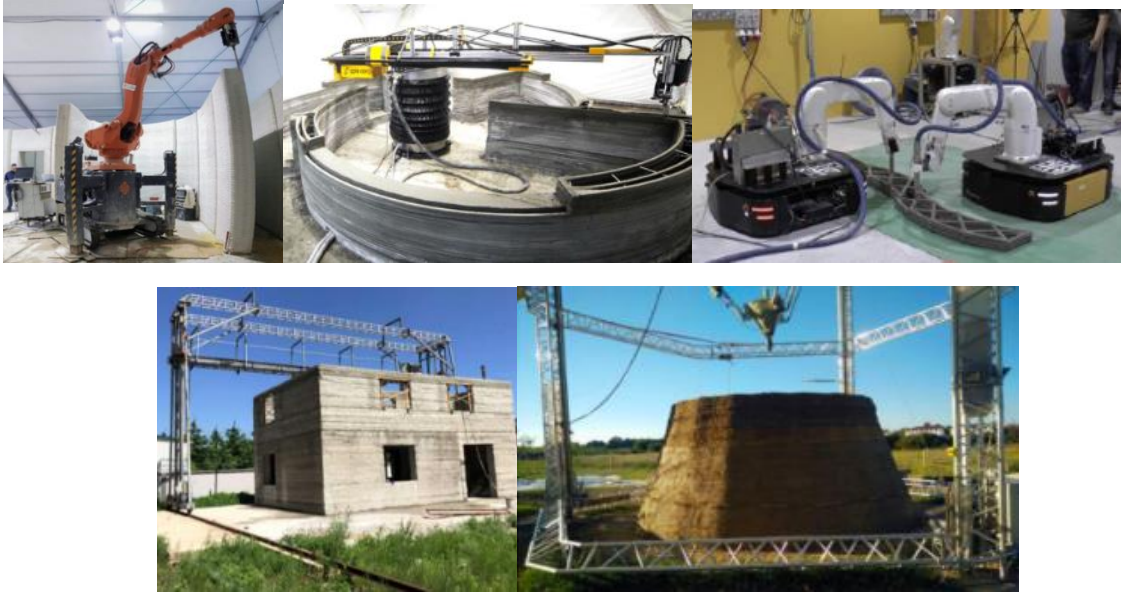


Joonis 1.2 Betooni 3D printeri süsteemi kirjeldus. 0. juhtimissüsteem; 1. roboti kontrolleri; 2. printimispea kontrolleri; 3. robotkäsi; 4. printimispea; 5. kiirendi mahuti; 6. kiirendi pump; 7. segupump; 8. segisti; 9. 3D prinditud keha [2, 6]

Oluline selle tehnoloogia jätkusuutlikkuse jaoks on rakendatavus suures mastaabis, ehk 3D printimine peaks olema võimalik välitingimustes ja suuremahulistel objektidel. Joonisel 1.3 on esitatud üks kontseptsiooni sellest, kuidas on võimalik eskaleerida 3D betooni printimist suuremaks. Hetkel maailmas reaalselt betooni printimise erinevaid võimalusi kirjeldab joonis 1.4. [5]

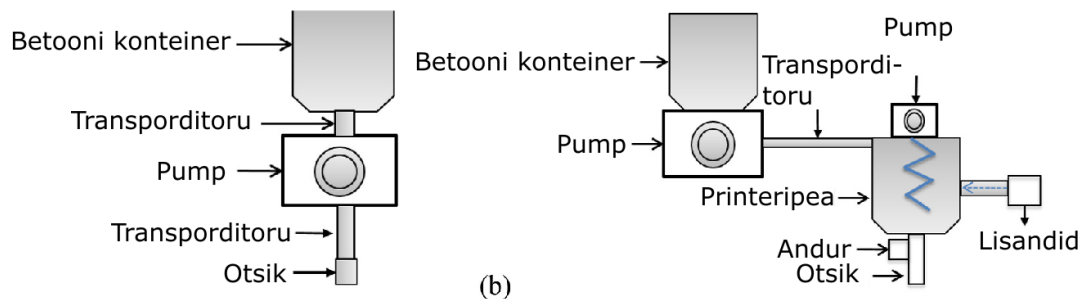


Joonis 1.3 Maja 3D printimise kontseptsioon [5]



Joonis 1.4 Suurte ja väiksemate betonelementide printimine [5]

Betooni printimisel materjali liigutamiseks on vaja kasutada pumpasid ning selleks peab materjali hoidvas süsteemis olema pump sisse ehitatud või tuleb sõtta materjal eraldi süsteemist pumpa, mis siis liigutab betoonisegu läbi torude. Pumpade paiknemine süsteemis on kirjeldatud joonisel 1.5.



Joonis 1.5 a) Ühe pumba süsteem, kus materjal pumbatakse kohe hoidlast otsikuni b) Kahepumba süsteem, kus kõigepealt liigutatakse materjal hoidlast pumpa ja sealt teine pump liigutab materjali otsikuni [5]

Printimisel on võimalik printida vertikaalse või horisontaalse otsikuga, mille juures on täiendavalt võimalik kasutada otsikut abiplaatidega ja abiplaatideta, mis on näidatud joonisel 1.6. Abiplaatide kasutamine võimaldab vähendada printimise aegset deformatsiooni. Tongji Ülikoolis uuriti printimisel abiplaatide kasutamist ning otsiku asetust printimise ajal. Leiti, et kui printimise otsik on vertikaalse suunaga, siis betooni deformatsioon on 50% suurem, kui horisontaalse suunaga otsikuga. [7]



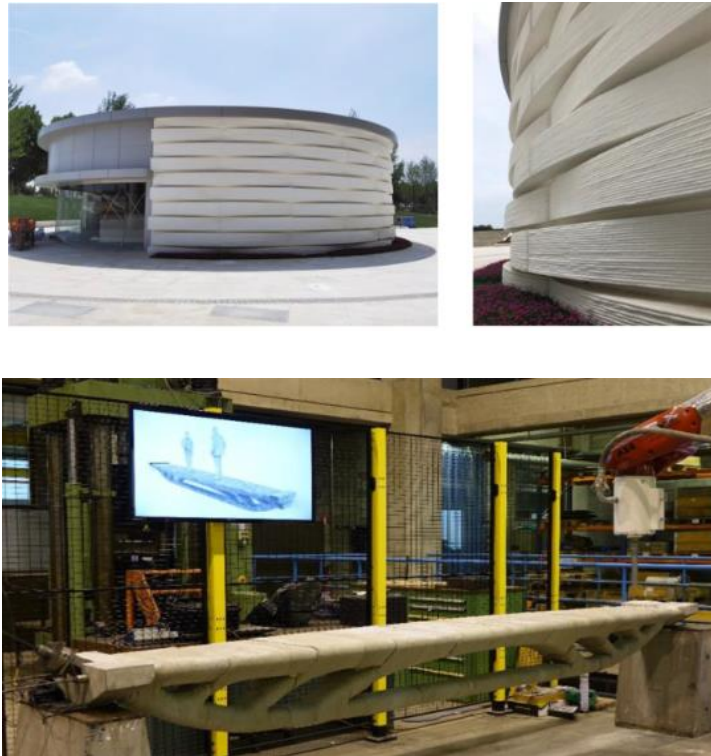
Joonis 1.6 Betooni printimise otsikud vasakult paremale: horisontaalse suunaga otsik, vertikaalse suunaga otsik, vertikaalse suunaga otsik koos abiplaatidega [7]

Antud uurimuste põhjal on võimalik kokkuvõtvalt järeldada, et betooni 3D printimine on reaalselt võimalik. Betooni printimine hõlmab endas palju automaatikat. Betooni printimisel on seadmetele ja komponentidele seatud parameetritel suur mõju printitud kehade kujule ja omadustele.

1.2.2 3D printitud betooni uurimise vajadus

Kui võrrelda ehitussektorit muude valdkondadega, siis ühtsed jooned ehitusvaldkonnas on, et tihtipeale valmivad objektid tähtajast hiljem ja ületavad etteantud eelarvet. Seda kõike võimendavad tänapäeval soodsa tööjõu puudus, materjalide tarneraskused ja madal produktiivsus. 3D printimise puhul on võimalik saavutada kokkuhoid tööjõu, materjalide ja logistika arvelt. 3D printitud betooni kasutamisel ei ole vaja ehitusplatsil raketise koostamise meeskonda, sealt omakorda tuleb kokkuhoid raketise materjalilt. See omakorda lühendab logistikaketti, mida on ehitusplatsil vaja, et betonist elemente või monoliitseid konstruktsioone toota. Lisaks on kaasaegse arhitektuuri puhul omajagu selliseid kohti, mis vajavad tehniliselt keerukat raketise lahendust. Betooni printimine võimaldab toota mõningaid arhitektuurselt keerukaid kohti ilma oluliste lisakuludeta võrreldes lihtsa geomeetriaga hoonetega. [14]

Tongji Ülikoolis, Hebei ja Dresdeni Tehnikaülikoolides läbi viidud uuringutes on jõutud järelduseni, et praegusel hetkel veel tasub 3D printimistehnoloogia end ära ainult seal, kus on arhitektuurselt keerukad elemendid (joonis 1.7). Lisaks järeldati, et suures mastaabis betooni printimisel võivad olla erinevad nõuded võrreldes laboris printitud betoonkehade valmistamisega. [5]



Joonis 1.7 3D prinditud elemendid [5]

Antud uurimustööde põhjal võib järeldada, et 3D printbetooni tehnoloogia vajab veel kõvasti uurimist ja optimeerimist, enne kui seda on võimalik laialdaselt kasutama hakata.

1.2.3 Vormi valatud betooni erinevus 3D prinditud betoonist

On tehtud mitmeid uuringuid, kus on võrreldud omavahel vormis valmistatud betooni ja 3D prinditud betooni valmistamist. Nendes uurimustöödes on mitmeid ühiseid jooni materjalide kulu, tugevusnäitajate ja kasutatava tehnoloogia osas.

Vormi valatud betoonide puhul valatakse betoon juba varem ette valmistatud kindla kujuga vormidesse, kuhu need seejärel jäetakse mõneks ajaks kivinema ning hiljem võetakse kehad vormidest välja ning jäetakse kivinema. 3D prinditud betoonide puhul ei kasutata vorme, vaid prinditakse betoon otse alusele ja jäetakse kivinema. [9]

Materjalide, tööjõu ja aja kulu juures on prinditud betoonide puhul võimalik saavutada kokkuhoid. Tööjõu kulu aitab kokku hoida automaatika osakaalu kasvatamine protsessis. Materjalide kokkuhoid on võimalik saavutada raketustmaterjalide koguse

vähendamisega. Betoonkeha valmistamise aja kulu aitab samuti vähendada automaatika osakaalu kasvatamine. [4]

Betooni printimisega on võimalik teha keerukamaid elemente kui vormidega. [4]

Kuigi 3D printbetoon võimaldab valmistada arhitektuurselt keerukamaid kujundeid, esineb tugevusnäitajates selge erinevus. Printbetoonide tugevuslikud näitajad on tihtipeale madalamad kui seda on vormis valmistatud elementidel. Seda peamiselt vormi ja prinditavate betoonide valmistamise protsesside eripäradest. [8]

Automaatika osakaal betoon printimisel on palju suurem, kui seda on vormis valmistatud betoonide puhul. Nimelt printimise jaoks on tarvis tarkvara ja masinaid, mis teostavad printimist. Seadme operaatorite rollide alla jääb põhiliselt süsteemi üles seadmine, aparaatidele parameetrite ette andmine ja masina töö jälgimine. Vormis valmistatud betoonide puhul on vaja rohkem inimtööjõudu vormi valmistamiseks, armeerimiseks, betoon vormi valamiseks ja pärast vormist lahti rakestamiseks. [4, 8, 9]

Kokkuvõtvalt võib antud uurimuste põhjal järeldada, et printimise protsessis on võimalik saavutada kokkuhoid automaatika osakaalu kasvatades. Automaatika kasutamiseks on vaja inimesi, kes on võimelised opereerima keerukamaid seadmeid. Printbetooniga on võimalik printida küll keerukama arhitektuuriga, aga madalamate tugevusnäitajatega elemente kui seda on võimalik vormis valmistatud betoonidega.

1.2.4 Prinditud betooni katsetamise võimalused

Prinditud betooni on võimalik katsetada survele, tõmbele, löikele ja paindele. Printbetoonide puhul erinevalt vormis valatud betoonidest on palju olulisem roll sellel, mis suunas katsekehasid testitakse. Mitmetes ülikoolides üle maailma on läbi viidud katseid printbetoonidega, kus on määratud betooni surve-, lõhestus-, painde- ja tõmbetugevust erinevates suundades. Üldiselt on uurimustes välja tulnud, et tugevusnäitajad võivad erineda suuresti, sõltuvalt mis suunas on prinditud katsekehasid testitud. Lisaks on võimalik määrata prinditud betoonide veeimavust ja testida terviklikke ristlõikeid (joonis 1.8). [2, 9, 10, 14]

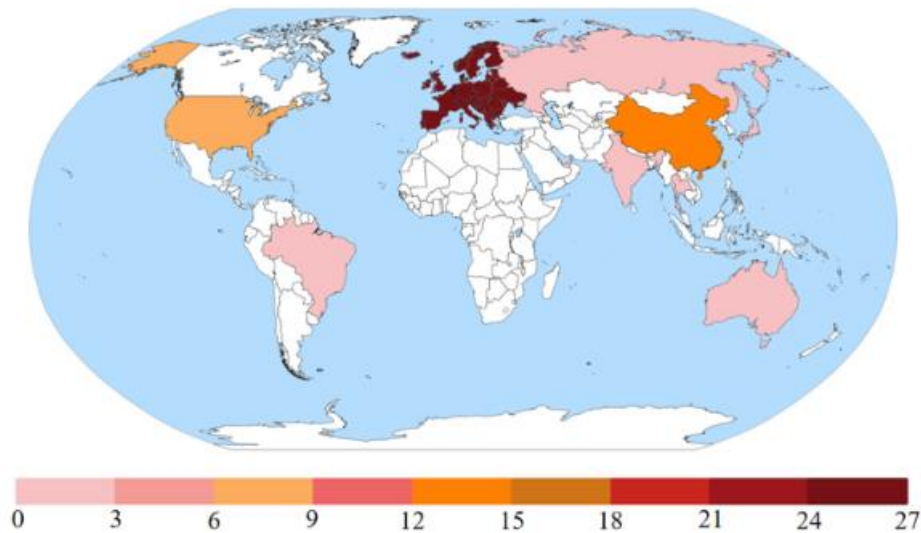


Joonis 1.8 3D prinditud betoonist postid ja seinad [2]

1.3 Varasemalt tehtud katsed ja uuringud 3D prinditud betooniga

Hiljuti on läbi viidud uuring selle kohta, kui palju maailmas üldiselt tehakse uurimistöid 3D printbetooniga. Selles uurimuses selgus, et üldiselt kuni 2017. aastani tehti vähe uurimusi sel teemal. 1997-2007 vahemikus avaldati kokku 8 artiklit betooni printimise kohta. 2017. aastal avaldati 14 artiklit ja 2020 aastal avaldati 116 artiklit betooni printimise kohta. Täiendavalt on uuritud, mitu patenti on väljastatud seoses betooni printimisega, kus leiti, et 1997-2007 ei väljastatud ühtegi patenti, alates 2007 hakkas patentide väljastamise arv vaikselt kasvama ja pärast 2017. aastat hakkas väljastatud patentide arv kasvama hüppeliselt. Lisaks on joonisel 1.9 märgata, et just Euroopas on kõige rohkem ettevõtteid, mis on seotud ja tegelevad 3D betooni printimisega ja selle uurimisega. Riikide absoluutarvude võrdluses tegeletakse kõige rohkem betooni printimisega USAs ja Hiinas. [14]

Kõik see omakorda näitab, et 3D prinditud betooni populaarsus ja aktuaalsus maailmas, eriti Euroopas, on hetkel kasvavas trendis. [14]



Joonis 1.9 Printbetooniga tegelevate ettevõtete jaotus maailmas [14]

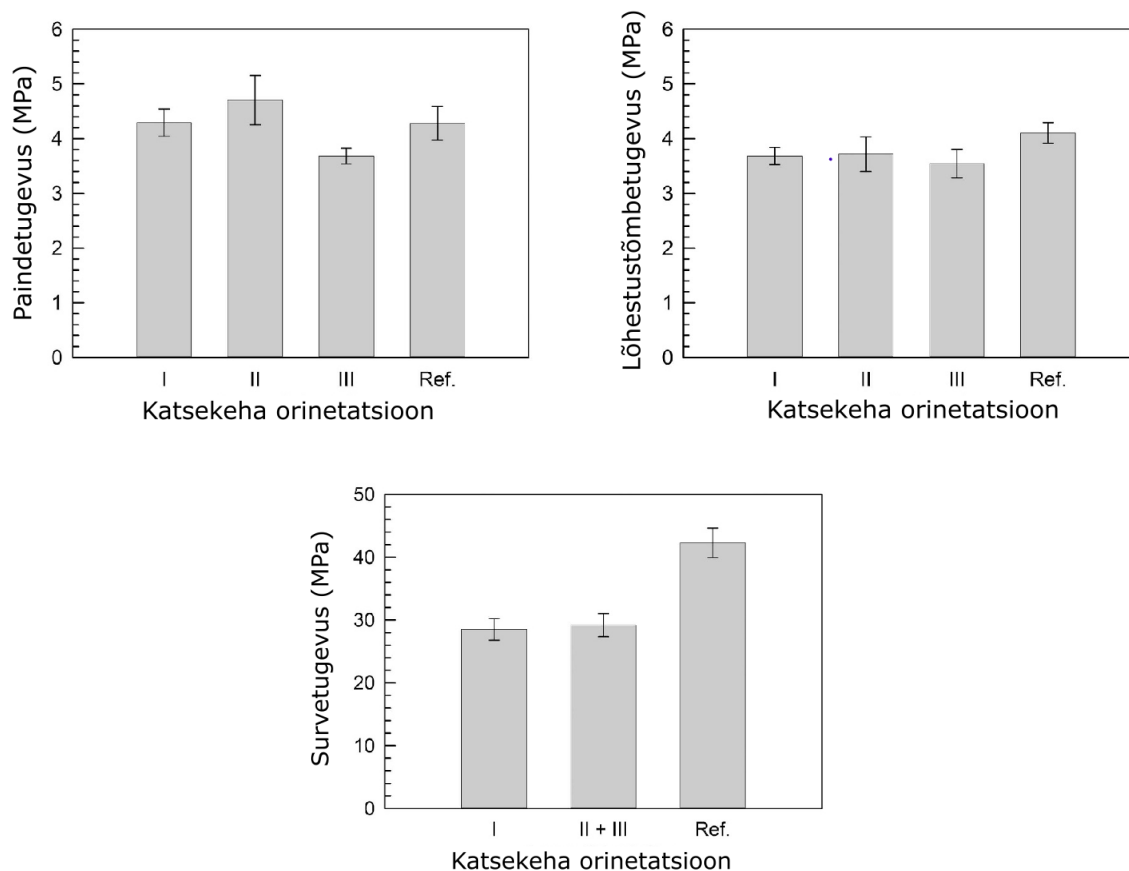
Antud uurimuse põhjal on võimalik järeldada, et peamiselt tegeletakse printbetooni tehnoloogiatega uurimisega regioonides, kus eksisteerib palju kõrgelt haritud inimesi ning kus ühiskond puutub igapäevaselt kokku automaatika ja kõrgtehnoloogiliste seadmetega. Seda põhjusel, et automaatika arendamine nõuab inimesi, kes on kõrgelt haritud selles valdkonnas ja ühiskonda, kes tunneb ennast mugavalt kõrgtehnoloogia kasutamisega.

1.3.1 Tugevuslik erinevus prinditud ja vormis valmistatud betoonkehade vahel

Eelnevalt on viidud läbi uuringuid selle kohta, kas ja kui suur on survetugevuse erinevus vormi valatud ja prinditud betooni vahel.

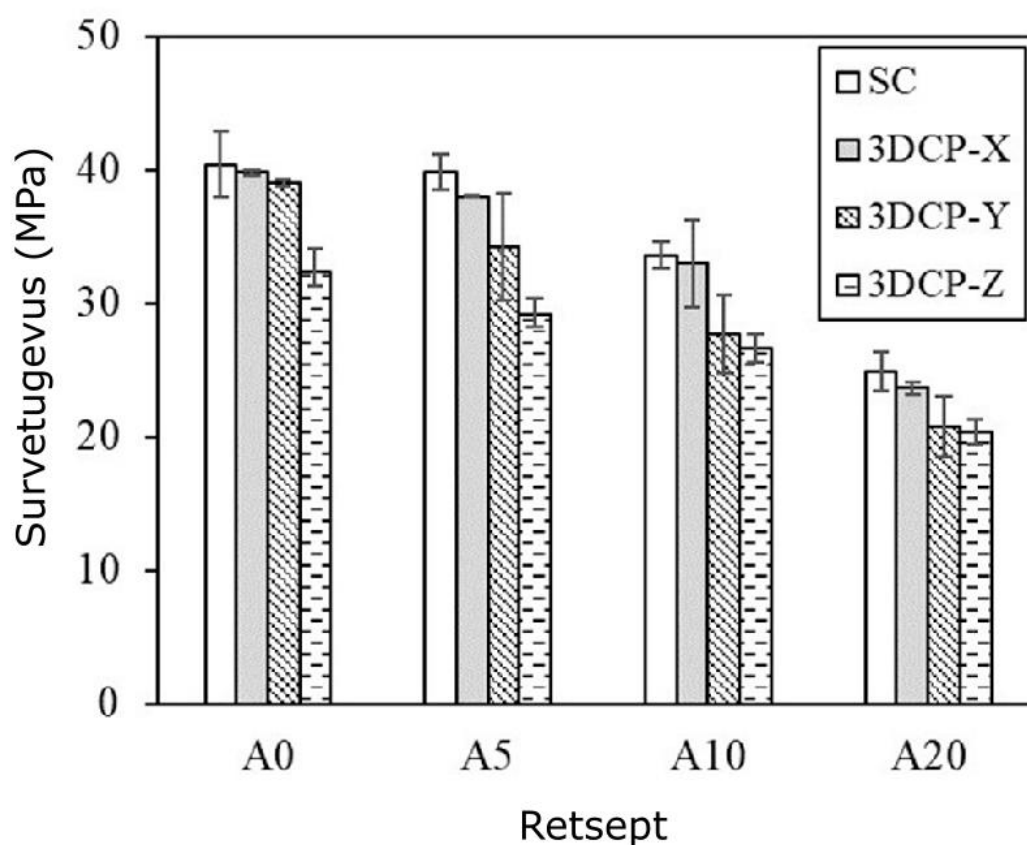
Hollandis Eindhoveni Tehnikaülikoolis viidi läbi katseseeria 3D prinditud betooni kuubikute ja vormi valatud betooni vahel. Leiti, et vormi valatud betooni survetugevus on ligi 31% suurem, kui seda on prinditud betooni survetugevus. Joonisel 1.10 on graafikud, kus on välja toodud vormi valatud betooni ja prinditud betooni surve-, painde- ja lõhestustõmbetugevused. Kuigi vormis valmistatud betoon oli suurema surve- ja lõhestustugevusega, kui prinditud betoon, oli prinditud betooni paindetugevuse teatud juhul suurem, kui vormis valmistatud betoonil. Antud katses prinditi uus kiht iga 15 sekundi järel. Survetugevusele katsetatud kuubikute

küljepikkus oli 40 mm nii vormis valatud katsekehadel kui prinditud betoonist välja lõigatud katsekehadel. [8]



Joonis 1.10 Prinditud ja vormis valmistatud betoonide tugevusnäitajate võrdlus [8]

Hebei Tehnikaülikoolis viidi läbi uurimus vormi valatud ja prinditud betoonide vahel, kus selgus, et vormi valatud betoonil on suurem survetugevus kui prinditud betoonidel, kui kasutatakse sama retsepti mõlema jaoks. Tulemus on välja toodud joonisel 1.11. Antud uurimistöös viidi katsed läbi erinevate kuivsegudega, kus peamine erinevus oli aerogeeli ja silikaatliiva koguses. A0-A20 retseptide koostised, keemiline kompositsioon ja kasutatud aerogeeli omadused on välja toodud tabelites 1.1, 1.2 ja 1.3. Survetugevuse määramiseks kasutati 70 mm kuubikuid. [13]



Joonis 1.11 Vormis valmistatud ja prinditud betoonide survetugevuste võrdlus [13]

Tabel 1.1 Tsemendi ja liiva koostis XRF analüüsi põhjal (osakaalu protsentides, %) [13]

Materjal	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
Tsement	1,0	8,2	11,1	24,9	0,1	3,0
Liiv		27,5	0,5	9,0		
Materjal	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Tsement	0,6	0,6	47,0	1,0	0,3	2,2
Liiv		0,1	62,3			0,5

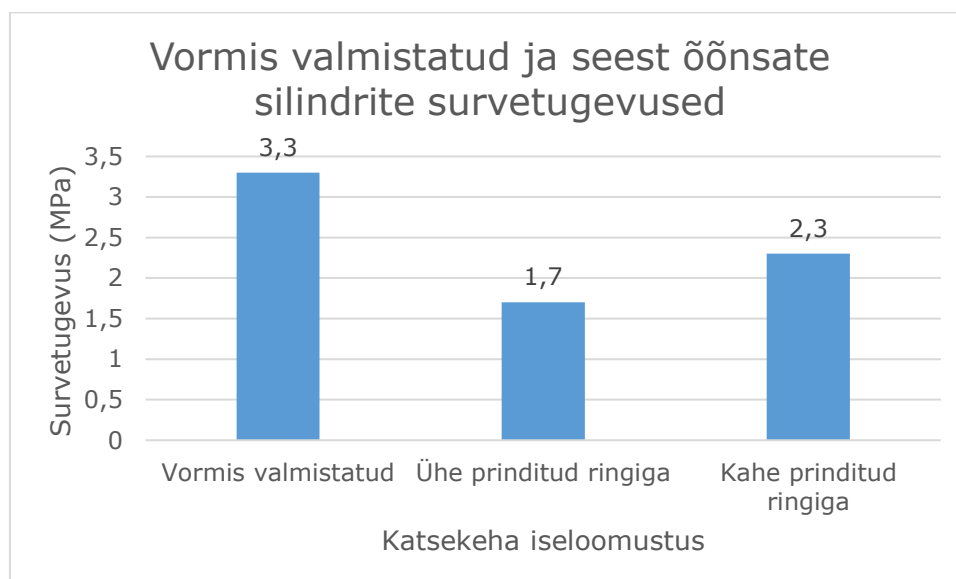
Tabel 1.2 Aerogeeli graanulite omadused [13]

Omadus	Väärtus	Ühik
Osakeste suurus	0,1-0,7	mm
Pooride diameeter	20	nm
Tihedus	120-140	kg/m ³
Soojuserijuhtivus	0,012	W/(m·K)
Pind	Hüdrofoobne	

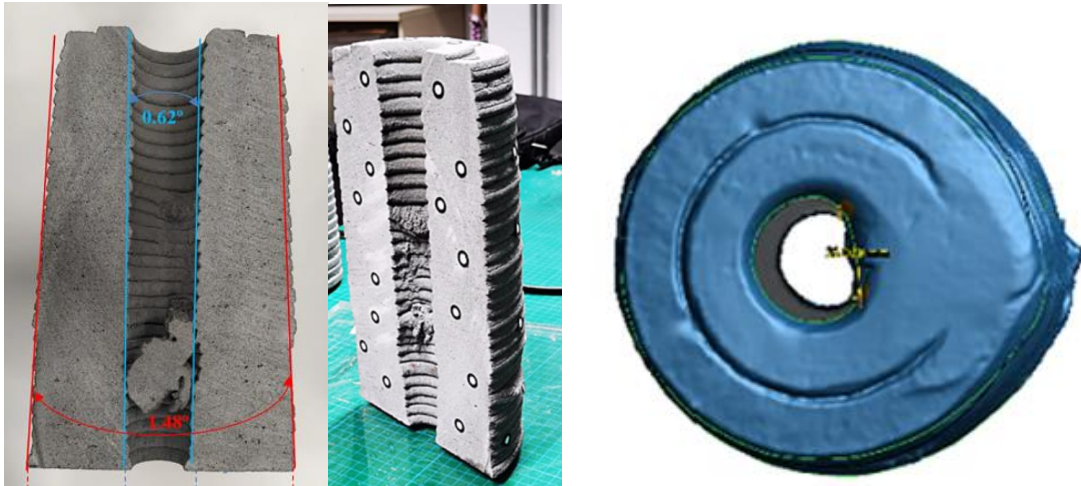
Tabel 1.3 Segude komponentide osakaalu suhtes tsemendi suhtes [13]

Segu	Tsement	Peenräni	Vesi	Liiv	Aerogeel	Superplastifikaator
A0	1,000	0,067	0,445	1,333	0,000	0,001
A5	1,000	0,067	0,445	1,261	0,005	0,001
A10	1,000	0,067	0,445	1,189	0,010	0,001
A20	1,000	0,067	0,445	1,067	0,018	0,001

Ka Navarro Ülikoolis läbi viidud uurimuses leiti, et vormis valmistatud katsekehadel on suuremad tugevusnäitajad, need on esitatud joonisel 1.12. Antud uurimuses selgus, et isegi kui printida seest õõnes silinder kahes kihis (joonis 1.13), on tugevusnäitajad endiselt madalamad kui vormis valmistatud betoonil. Lisaks sellisel juhul kasutatakse sama palju kui mitte rohkem materjali, kui seda tehti vormis valmistatud katsekeha puhul. [4]



Joonis 1.12 Navarro Ülikoolis läbi viidud survekatsete tulemused [4]



Joonis 1.13 Kahes kihis prinditud seest õõnes silinder [4]

Analüüsisel põhjuseid, miks prinditud katsekeha on nõrgem vormis valmistatud kehast, leiti, et üks peamine põhjustest on, et vormis valmistatud katsekeha jäi pärast betooni valu vormi kivinema ning vorm katsekeha ümber käitus kui hüdroisolatsioon, mis ei lasknud veel katsekehast välja liikuda ning seetõttu oli reaktsioonide jaoks betoonis saadaval rohkem vett, kui seda oli prinditud katsekehas, millest vesi sai betoonist takistamatult välja liikuda. Teine suur tegur oli katsekehade veemavus, kus prinditud betoonidel oli suurem veemavus kui vormis valmistatud katsekehadel. Leiti, et suurema veemavuse põhjustab printimise protsess ise, kus betoon tuleb toru otsast välja ilma, et seda oleks pärast printimist tihendatud. [10]

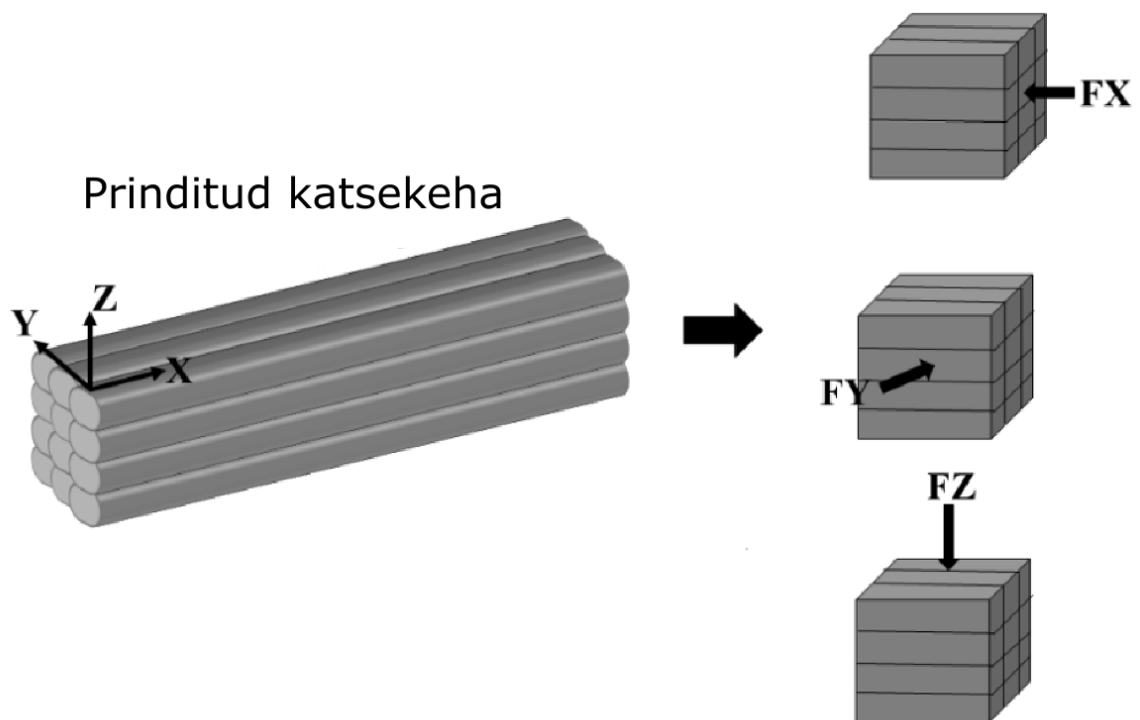
Kui võrrelda omavahel selles peatükis käsitletud uurimustöid, kus on omavahel võrreldud vormis valmistatud ja prinditud betoone. Antud uurimustööde põhjal võib järeldada, et vormis valmistatud betoonidel on küll suuremad survetugevused, aga paindetugevus võib kohati olla suurem printbetoonidel, kui vormis valmistatud betoonil. Lisaks võib järeldada, et katsekeha vormis hoidmise aja ja lõplike tugevusnäitajate vahel on seos.

1.3.2 Prinditud betooni katsetamise suuna mõju katsetulemusele

Varasemalt tehtud uurimistöödest on võimalik välja tuua, et prinditud betoonist välja lõigatud katsekehadel, erinevalt vormi valatud betoonist, on oluline, millises suunas on katsekeha purustatud.

Xi'ani Arhitektuuri- ja Eindhoveni Tehnikaülikoolis viidi läbi katsed, kus prinditud betoonist välja lõigatud katsekehad purustati erinevates suundades ning uuriti katsekehade painde-, lõhestus- ja survetugevust.

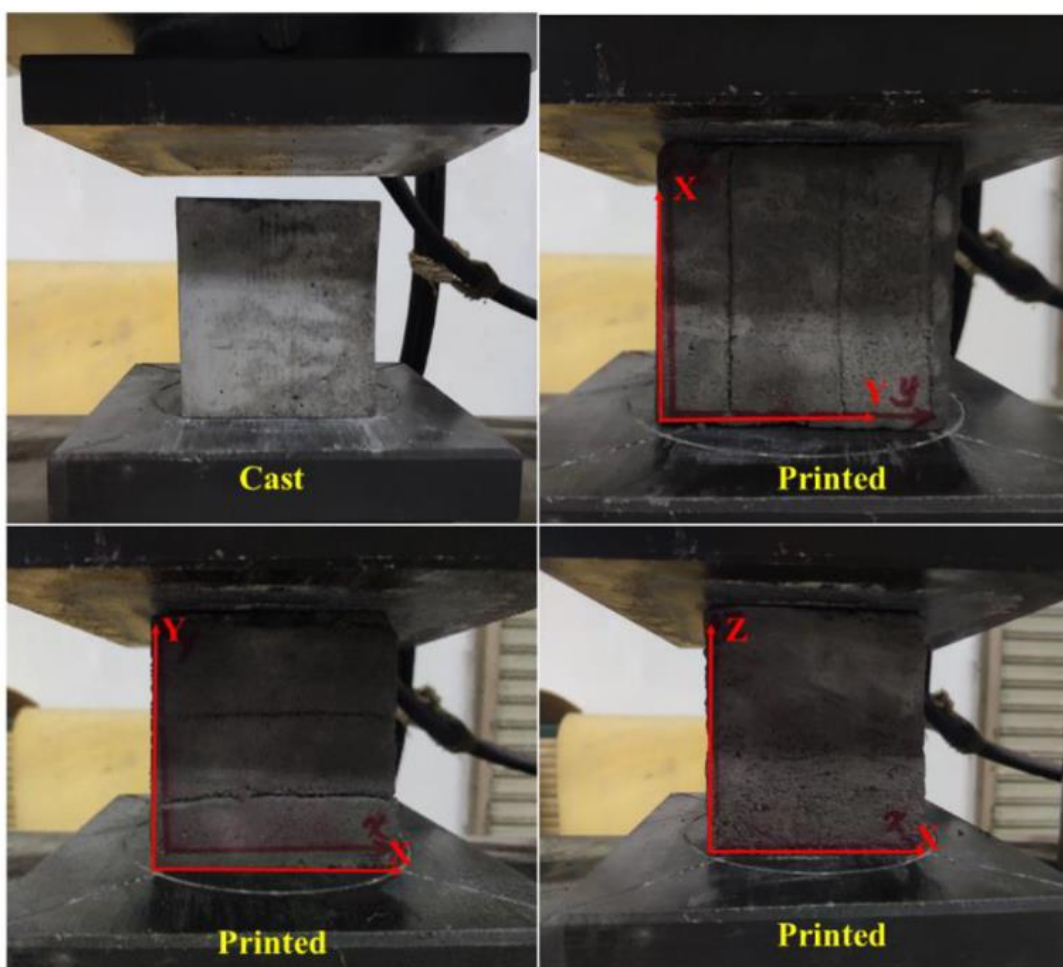
Ühtluse huvides kutsume Xi'ani Ülikoolis läbiviidud katsetel suunda FZ edaspidi seinä püsti suunaks. Ja suundasid FX ja FY vastavalt seinä pikisuunaks (printimise suund) ja seinä risti suunaks. Suundade nimetused on näidatud joonisel 1.14.



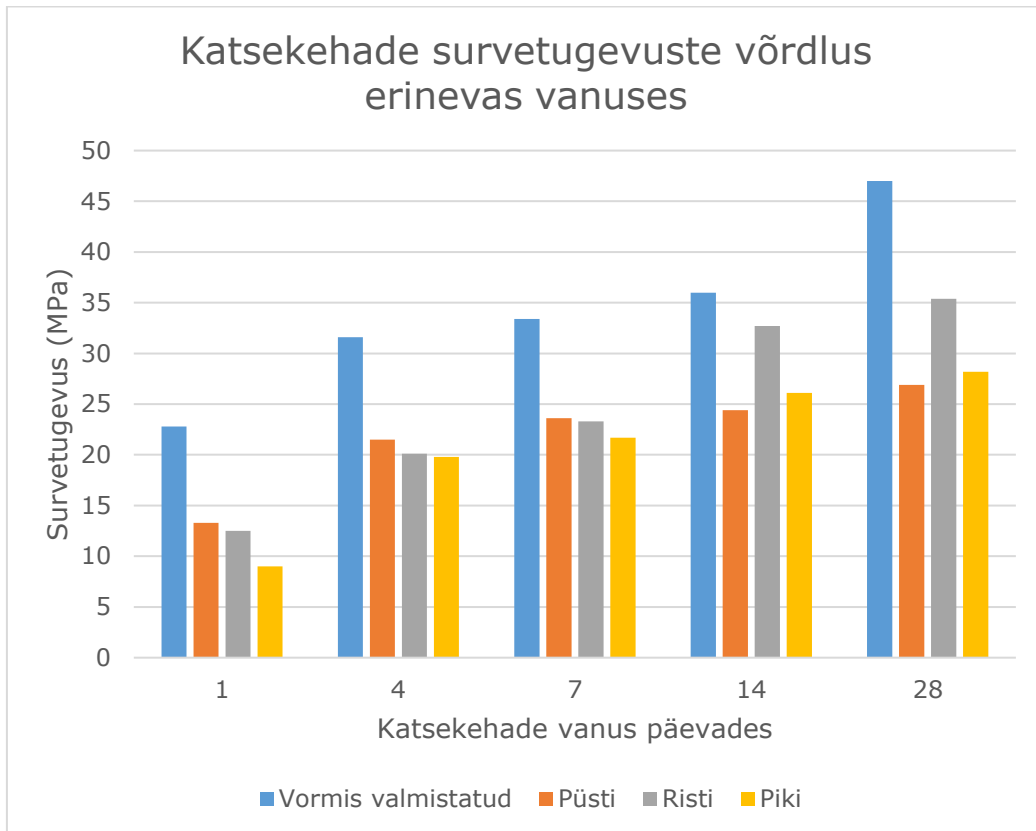
Joonis 1.14 Prinditud katsekeha suundade tähised. FX – Pikisuund, FY – Ristisuund, FZ – Püsti suund [9]

Xi'ani Arhitektuuri Ülikoolis viidi läbi survetugevuse katsed 100 mm küljega kuubikutega, mis lõigati välja prinditud betoonist. Kuubikud katsetati 1, 4, 7, 14 ja 28 päeva vanuses. Survetugevuse katseliseks määramiseks asetati katsekehad pressi alla (joonis 1.15). Uurimistöö tulemustest on võimalik välja lugeda, et tugevusnäitajaid

mõjutab, mis suunas toimub prinditud betooni purustamine. Survetugevuse katselisel määramisel tuli välja, et esimese 7 päeva jooksul läbi viidud katsetes on tugevusnäitajate erinevus omavahel väike, kus seinaga püstisuunas purustatud katsekeha tugevusnäitaja erinevus võrreldes teiste suundadega oli väiksem kui 8%. Suurt tugevusnäitajate erinevust oli märgata 14. ja 28. päeval läbi viidud katsete puhul, kus seinaga risti suunas purustatud katsekeha on märkimisväärselt suurema tugevusega kui teistes suundades katsetatud katsekehadel. Nimelt on 14. ja 28. päeval läbi viidud katsete puhul seinaga risti suunas purustatud katsekeha tugevus vähemalt 20% suurem kui teistes suundades purustatud katsekehade tugevus. Tulemusi graafilisel kujul välja toodud joonisel 1.16 [9]

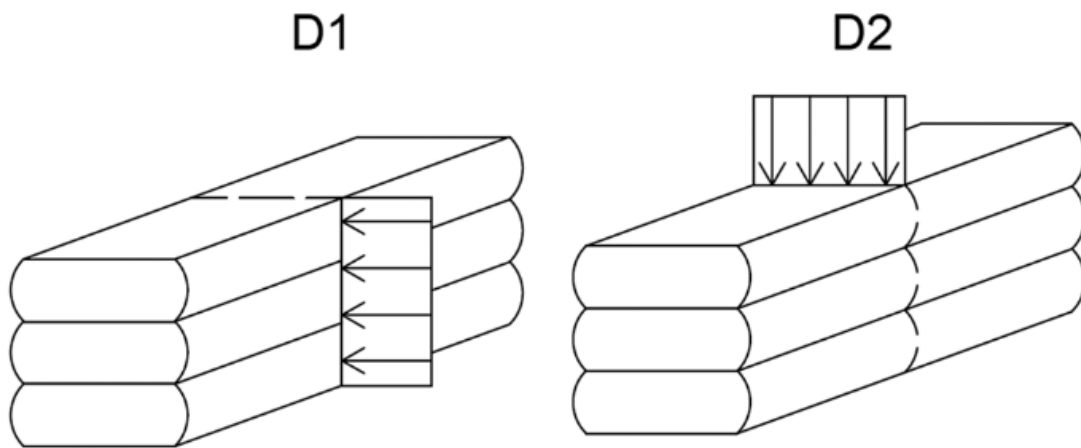


Joonis 1.15 Katsekehad survepressi vahel [9]

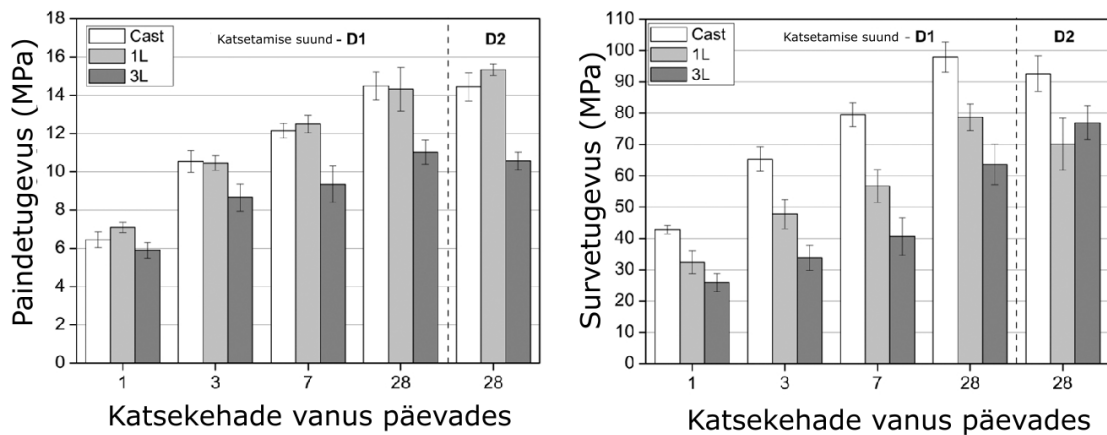


Joonis 1.16 Prinditud ja vormis valmistatud betoonide survetugevuste võrdlus erinevas vanuses [9]

Analoogseid uurimusi on läbi viidud ka Lääne Pomerani ja Berliini Tehnikaülikoolis, Sejongi, Mansura ja Al-Azhari ülikoolides, kus võrreldi omavahel vormis valmistatud ja prinditud betooni. Lisaks uuriti nendes uurimustes katsekehade veemavust ja struktuuri. Antud uurimused annavad kinnitust, et 3D prinditud betooni tugevus sõltub sellest, millises suunas katsekeha purustati ning et vormi valatud katsekeha on üldiselt suurema survetugevusega kui prinditud betoon. Joonisel 1.17 on kirjeldatud, mis suunas toimusid antud uurimistöodes koormamised ning katsete tulemuste koondtabel on esitatud joonisel 1.18. Kõige suurem tugevuste erinevus prinditud ja vormi valatud katsekehade vahel esines 7 päeva pärast valamist, pärast mida see vahe kahanes aja kulgedes. [10]



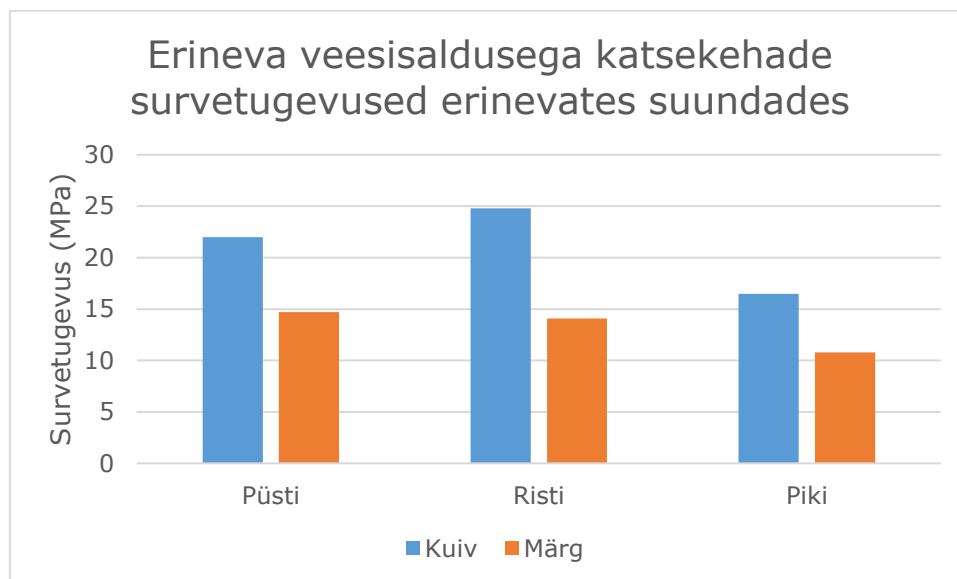
Joonis 1.17 Prinditud betooni koormamise skeem [10]



Joonis 1.18 Prinditud ja vormis valmistatud betoonide tugevusnäitajate võrdlus erinevates suundade koormamisel [10]

TTÜs viidi läbi katsed 2022. aasta kevadel, kus uuriti, kuidas mõjutab prinditud betoonist kuubiku katsetamise suund katsetulemusi. Jürgen Tammepärgi läbi viidud uurimuses viidi katsed läbi 9 kuiva ja 9 märja katsekehaga. Katsekehad olid kuubid küljega 50 mm. Läbi viidud katses selgus, et katsekeha valmistamise ja katsetamise meetodikal võib olla märkimisväärne mõju selle tulemusele. Kõige suurem tugevus, mis märja katsekehaga survekatsel saadi, oli 24,8 MPa, kõige madalam näitaja oli 16,5 MPa. Vahe suurima ja madalaima tulemuse vahel oli märja katsekeha puhul 33%. Kuiva katsekeha puhul suurim tulemus, mis saadi, oli 14,7 MPa ja madalaim 10,8 MPa. Suurima ja madalaima tulemuse vahe kuiva katsekeha puhul oli 23%. On oluline mainida, et katsed viidi läbi katsekehadega, mis lõigati välja 3D prinditud betoonkehadest, millega oli juba läbi viidud varasemaid katsed, mis võivad, aga ei

pruugi mängida rolli antud tulemuste puhul. Koondtulemus on graafilisel kujul välja toodud joonisel 1.19. [2]



Joonis 1.19 Erineva veesisaldusega katsekehade survetugevuste võrdlus erinevates suundades koormamisel. Suundade täpsem kirjeldus on välja toodud peatükis 3.1 [2]

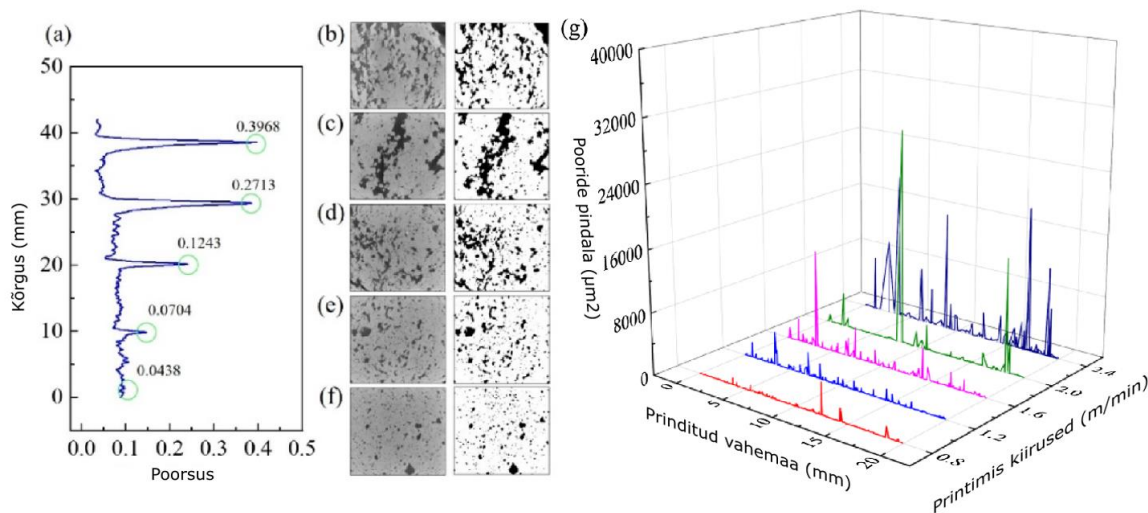
Antud peatükis välja toodud uurimuste põhjal võime järeldada, et prinditud betoonide puhul on oluline pöörata tähelepanu, mis suunas prinditud betooni katsetatakse. 3D prinditud betoon suudab võtta, sõltuvalt koormamise suunast, vastu erinevas suurusjärgus koormusi. Ühise joonena on märgata, et seina piki suunaliselt suudab printbetoon võtta vastu vähem koormus, kui teistes suundades. Seina piki ja risti suundade tugevusnäitajate vahel väga suurt erinevust uurimustöodes välja ei tulnud.

1.3.3 Prinditud betoonide kihtide vaheline nake

Anhui Tehnikaülikoolis viidi läbi uuring 3D prinditud betoonidega aja mõjust kihtide omavahelisele nakkele. Lisaks uuriti, millist mõju avaldab printimise kiirus prinditud betoonide omadustele.

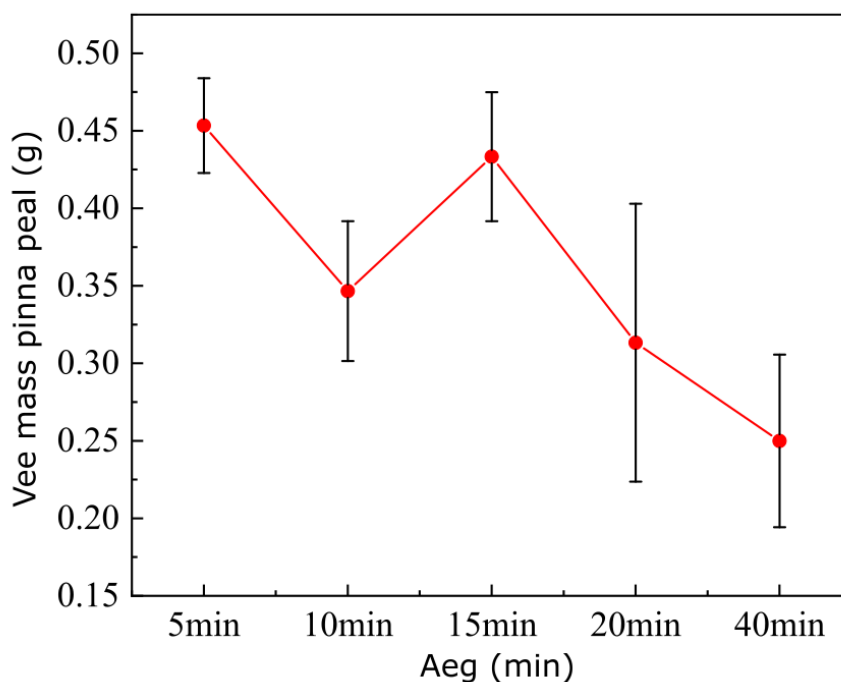
Antud uuringus leiti, et suuremal kiirusel printides suurenes materjali veemavus kihtide vahelises piirkonnas võrreldes madalama kiirusega printimisega. Katse viidi läbi selliselt, et prinditi mitu kihti betooni, kus iga kiht prinditi erineva kiirusega ja seejärel uuriti kihtide erinevusi. Printimiskiiruste 0,8 ja 1,2 m/min juures leiti, et veemavus kihtide vahel oli väike ja võrreldav kihtide sees oleva veemavusega. Kui

printimise kiirus oli suurem, kui 1,2 m/min, muutus kihtide vaheline veemavus märgatavalt. Kiiruste 2-2,4 m/min juures esines väga suur veemavus kihtide vahelises piirkonnas. Graafilisel kujul kirjeldab joonis 1.20 antud uurimuse käigus saadud tulemusi. [21]



Joonis 1.20 Veemavuse sõltuvus printimise kiirusest. Vasakult paremale: veemavus printitud kihtides, pilt pooridest kihtides, printimise kiiruse ja veemavuse sõltuvuse graafik [21]

Uuringu käigus mõõdeti ka veesisaldust kihtide vahelises piirkonnas ja joonisel 1.21 on ilmne, et kuni 15 minutini kahanes ja kasvas veesisaldus betooni pinna lähedal, seda põhjusel, et betooni seest liikus välja vett, mis tõstis vee sisaldust betooni pinna lähedal mõneks ajaks, aga pärast 15 minutit hakkas veesisaldus betooni pinna lähedases piirkonnas kahanema. See omakorda tähendas seda, et kihtide vaheline nake sõltub kahe kihi printimise vahelisest ajast. Pärast 15 minutit, mida kauem oodata uue kihi peale printimisega, seda kehvemaks muutub uue kihi nake olemasoleva kihiga, mis omakorda mõjutab märgatavalt tugevusnäitajaid selles piirkonnas. [21]



Joonis 1.21 Veesisalduse prinditud betooni pinnalähedases piirkonnas [21]

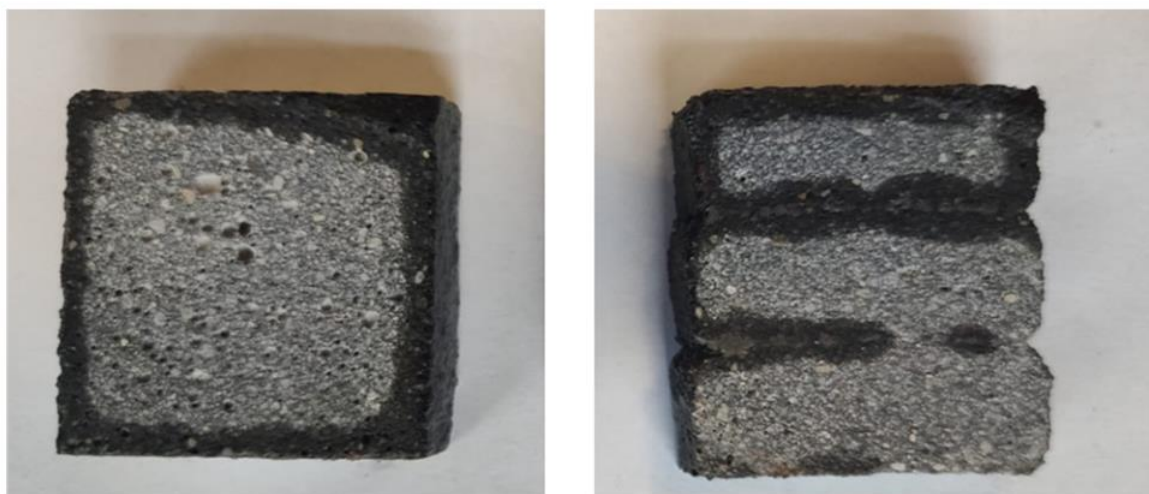
Uuringus järelitati, et väga oluline on leida õiged printimise parameetrid, mille juures printimise kiirus ei oleks liiga kiire, et ei tekiks suur veemavus prinditavate kihtide vahel ja ei oleks liiga aeglane, et väheneks kihtide vaheline nakketugevus.

Antud uurimistöö põhjal võib lisaks järeltada, et kihtide vaheline printimise kiirus võib mängida rolli kihtide omavahelise nakke juures. Juhul, kui liiga kaua oodata uue kihi peale printimisega, võib juhtuda olukord, kus kihtide vaheline nakketugevus kasvab aeglasemalt ja saavutab madalamad tugevusnäitajad kui kihi sees olev betoon. Seda põhjustaks vee takistamata välja liikumine prinditud kihist.

1.3.4 Veeimavus prinditud betoonides

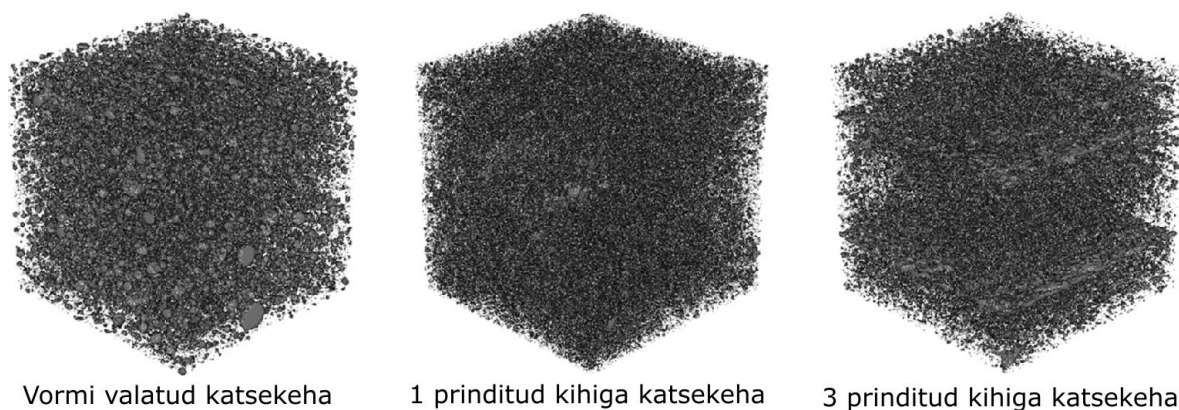
Poola, Saudi Araabia, Egiptuse ja Saksamaa ülikoolides on uuritud vormis valmistatud ja prinditud betoonide poore. Leiti, et vormis valmistatud katsekehad on väiksema veemavusega kui prinditud betoonid ning prinditud betoonide puhul on kihtide vahelises piirkonnas suurem veemavus võrreldes prinditud kihi sisemise veemavusega. Joonisel 1.22 on näidatud, millistes piirkondades toimus kõige suurem vee liikumine poorides ning sealt on selgelt märgata, et prinditud kihtide vahel on vee liikumine lihtsam kui katsekeha teistes piirkondades. Täiendavalt on joonisel 1.23

võimalik näha suuremat mõõdetud pooride kontsentratsiooni just prinditud kihtide vahelises piirkonnas. [10]



Joonis 1.22 Vasakult paremale: vormis valmistatud katsekeha, prinditud betoonist välja lõigatud katsekeha. Tume osa on märgunud betoon [10]

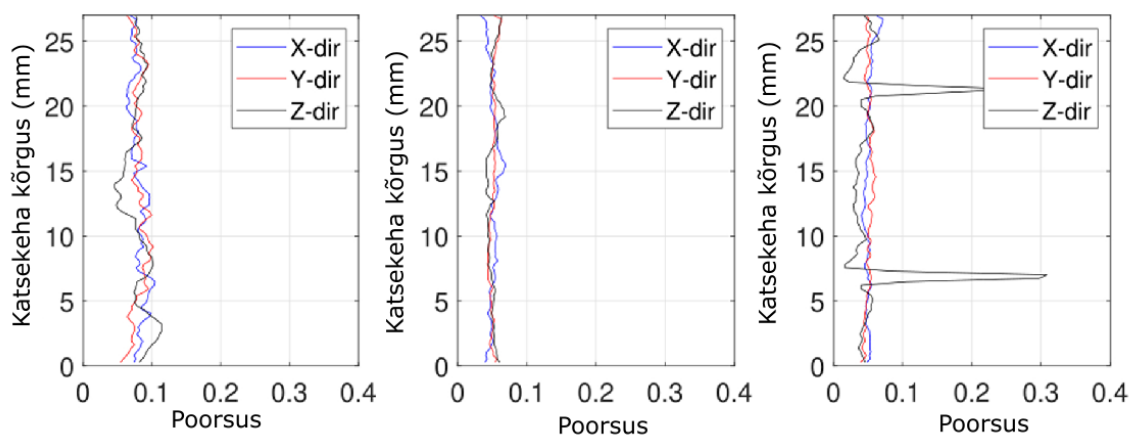
Suuremate ja väiksemate kuubikutega tehtud röntgenuuringu visualiseering on näidatud joonisel 1.23. Tabelis 1.4 on välja toodud antud uuringu käigus saadud tulemused. Tuli välja, et üldine pooride pindala oli vormis valmistatud katsekehades väiksem, aga kinniste pooride läbimõõt oli suurem, kui prinditud katsekehades. [10]



Joonis 1.23 Röntgenuuringu visualiseering [10]

Tabel 1.4 Pooride uuringu tulemused [10]

Katsekeha	Pooride maht (cm ³)	Veeimavus Hg järgi (%)	Pooride pindala (m ²)	Keskmine pooride läbimõõt (nm)
vormis valmistatud	37,9	8,2	6,5	23,4
1 kihina prinditud	34,2	7,9	9,2	14,9
3 kihina prinditud	37,9	6,7	8,4	18,0



Joonis 1.24 Veeimavus katsekehas erinevatel kõrgustel. Vasakult paremale: vormis valmistatud katsekeha, 1 kihis prinditud katsekeha, 3 kihis prinditud katsekeha [10]

Lanzhou, Nanjingi- ja Singapuri ülikoolides kasutati röntgenporomeetriat ja uuriti vee liikumist 3D prinditud betoonides. Üldiselt oli prinditud betoonide tühimike jaotus täiesti erinev kui vormis valmistatud betoonides. Avastati, et kui vormis valmistatud pooride tühimikud olid ühtlaselt jaotunud üle kogu vaadeldava piirkonna, siis prinditud betoonide poorid oli pikliku ellipsoidse kujuga. Avastati lisaks, et eksisteeris tühimikke, mis olid pikad ja paiknesid suuresti prinditavate kihtide vahel. See omakorda mõjutab negatiivselt betooni veepidavust ja võimaldab vedelikel vabamalt liikuda kihtide vahelisel alal. [20]

Antud uuringute põhjal võib järeldada, et prinditud betoonides ei ole poorid ühtlaselt kogu betooni lõikes jaotunud. Uuringutes tuli ühise joonena välja, et prinditavate kihtide vahelises alal on pooride kontsentratsioon palju suurem, kui seda on kihi sees olevates piirkondades. Sellest lähtuvalt oleks mõistlik printimise ajal tagada olukord, kus toru sisse ei saaks tekkida liigseid õhu auke, mis omakorda põhjustaks kihtide vahelisel alal suure veeimavuse.

2. KATSELINE OSA

Magistritöö katselise osa eesmärk on uurida 3D vabalt prinditud betooni tugevuse muutust ajas. Ühel juhul kahes erinevas kivistumise keskkonnas ja võrrelda neid tulemusi omavahel. Teisel juhul oli eesmärk võrrelda samades tingimustes kivistunud katsekehade tugevusnäitajaid erinevates suundades. Esimene katseseeria viidi läbi märtsis ja aprillis, teine katseseeria viidi läbi septembris ja oktoobris 2022. aastal.

Esimese ja teise seeria katsekehad on valmistatud samast betoonisegusest. Esimese seeria puhul jäeti ühed katsekehad hooldamata ($\sim 20^{\circ}\text{C}$, RH 35-45%) keskkonda ja teisel juhul hooldatud ($\sim 20^{\circ}\text{C}$, RH 100%) keskkond kivinema. 3 päeva pärast printimist lõigati prinditud kehadest välja 50 mm küljega betoonkuubikud, millest pooled kaeti kilega ja pooled jäeti toatingimustesse kivinema. Katsed välja lõigatud kuubikutega viidi läbi 3, 7, 14 ja 28 päeva möödumisel. Täiendavalt mõõdeti 28 päeva vanustel katsekehadel veeimavust.

Teise katseseeria puhul saeti 1. ja 2. päeval välja 3. päeva katsekehad, mis jäeti toa temperatuuril oleva vee alla kivinema. Katsekehad, mida välja ei saetud, kaeti kilega ja käidi igapäevaselt rohke veega kastmas, et takistada vee välja liikumist betoonist. 7. ja 28. päeva vanused katsekehad saeti 2 päeva enne katsetust välja ja jäeti vette edasi kivinema. Mõõdetud temperatuur ruumis printimise päeval oli $21,7^{\circ}\text{C}$. Katsekehadeks teises seerias olid 40 mm küljega kuubikud, $40 \times 40 \times 160$ mm ja $30 \times 30 \times 120$ mm risttahukad, 300 mm pikkused seinaelemendid väljatõmbe katsete jaoks. Katsed teise seeriaga viidi läbi 3., 7. ja 28. päeval pärast kivistumist.

2.1 Katseplaan

1. Ettevalmistustöö betooni printimiseks
 - a. Kuivsegude kokku segamine
 - b. Printimise ala pinna ette valmistamine printimiseks
 - c. Kivistumiskeskkondade ettevalmistamine pikema hoiustamise tarbeks
2. Katsekehade printimine
3. Prinditud katsekehadest vajalike mõõtmega elementide välja lõikamine

4. Katsestendide ettevalmistamine katsetusteks
5. Katsekehade tugevusnäitajate määramine
6. Katsekehade veesisalduse määramine

2.2 Katsemetoodika

2.2.1 Kasutatud katsematerjalid

Esimeseks printimiseks valmistati kuivsegu kokku 500 kg, teiseks printimiseks 180 kg. Kuivsegu valmistamisel kasutati peenliiva fraktsiooniga 0-0,5 mm, jämeliiva fraktsiooniga 0,5-1,2mm, KNC portlandtsementi CEM I 52,5R, polüetüleenist kiudu pikkusega 5 mm, pulbrilist kivistumise kiirendit, pulbrilist superplastifikaatorit ning veehoidvust suurendavat lisandit.

Kuivsegu segati kokku 45 kg segumites (joonis 2.1) – esmalt kaaluti välja vajalikud kogused (tabel 2.1) ning seejärel segati igat masinatäit vähemalt 10 minutit. Kuivsegud asetati ämbritesse 33,3 kg kogustes (joonis 2.2). Ämbrite kaaned käisid tugevalt kinni, et takistada niiskuse liikumist anumasse.

Tabel 2.1 Betoonisegu koostis

Koostiskomponendid	Segu koostis		1 m ³ kohta
	%		kg
Tsement	25	409,9	1658
0-0,5 Mira	45	737,8	
0,5-1,2 Mira	30	491,9	
Fiber	0,05	0,820	
Kiirendi	1	16,40	
Plastifikaator	0,02	0,328	
Veehoidvus	0,05	0,820	

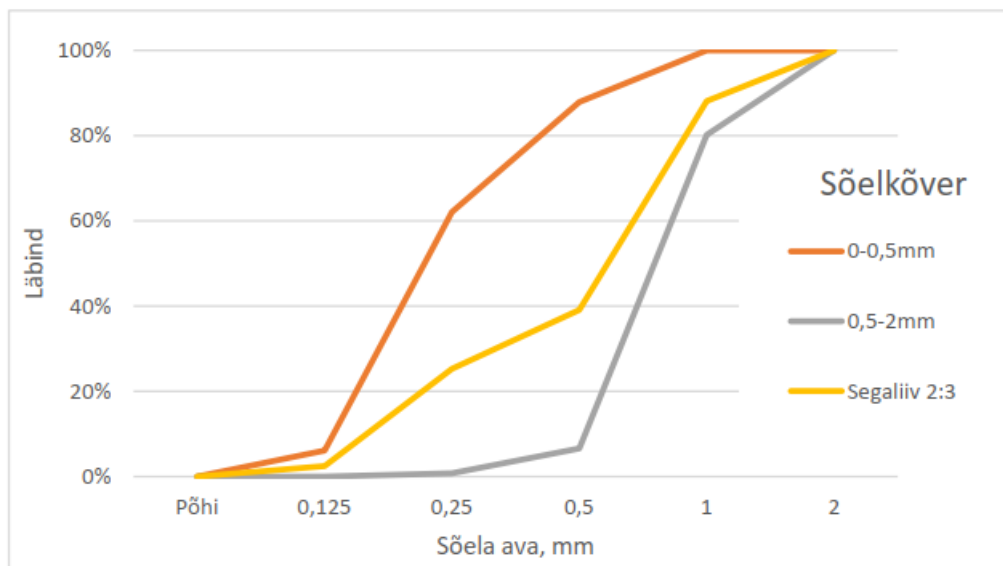


Joonis 2.1 Segisti, mida kasutati kuivsegu kokku segamiseks



Joonis 2.2 Ämbrid, mille sees hoiustati kuivsegu

Liivade jaoks määrati sõelkõverad ühekordsel katsel 500 g prooviga. Liivad sõeluti kuue minuti vältel kasutades järgmiseid sõelasid: 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm ja 0,125 mm. Seguliiva sõelkõver on arvutuslik. [2]



Joonis 2.3 Liivade sõelkõverad – jämeliiv, peenliiv ja nende segu vahekorraga 2:3

2.2.2 Kasutatud tööriistad ja seadmed

Kuivsegu valmistamine:

Kaal, kühvel, ämber, betoonisegisti

Betooni printimisel:

Kaal, ämber, betoonisegisti, mördipump, robotkäsi, toru (betooni transpordiks pumbast robotkäeni), printimistoru otsikud, sildkraana koos konksuga (pumba ja roboti vahelise toru toestamiseks), printimisalus, veevoolik koos pihustiga, kellu, labidas

Katsekehade hoiustamine:

Ladustamisalus, polüetüleenkile, niisked lapid, veeämber, veevoolik

Katsekehade purustuskatsetamiseks ettevalmistamine:

Sileda pinnaga klaasalus, lusikas, plastanum, kaal, pintsel, saepink, marker, joonlaud, lihvimise alus

Katsekehade purustamine:

Survestend, paindestendid, arvuti, metallist klotsid, hari, klaasalus, mehaaniline nihik

Katsekehade veeimavuse mõõtmine:

Ämber, kuivatuskapp, kaal, arvuti

2.2.3 Printimiskeskonna kirjeldus ja seadmete parameetrid

Katsekehade printimiseks kasutati 6 vabadusastmega robotkäel põhinevat betooniprinterit. Printimisalal paigutati katsekehade alla 10 mm paksune veekindel vineer. 3D printer töötab ühe pumba süsteemiga, kus pump on liini alguses. Seguliini pikkus pumbast kuni printimispeani on 5 m. [2]



Joonis 2.4 Robotkäe juhtimissüsteemiga 3D printer 1) betooni segisti 2) betooni pump 3) betooni pumba kontrolleri 4/5) vooliku siseläbimõõduga 50 mm ja printimispea siseläbimõõduga 35 mm 6) 6-teljeline robotkäsi 7) robotkäe kontrolleri (foto Jürgen Tammepärg, 2022)

Betooni printimiseks kasutatud seadmete põhiparameetrid:

- Robotkäe maksimaalne tööraadius 2,35 m
- Pumba kiirus 3 L/min
- Segisti maht 80 L
- Vooliku pikkus 5 m
- Vooliku siseläbimõõt 50 mm
- Printimispea toru siseläbimõõt 35 mm
- Prinditud 1 kihi kõrgus 15 mm
- Printimiskiirus 6,8 cm/s

2.2.4 Printimise protsessi kirjeldus

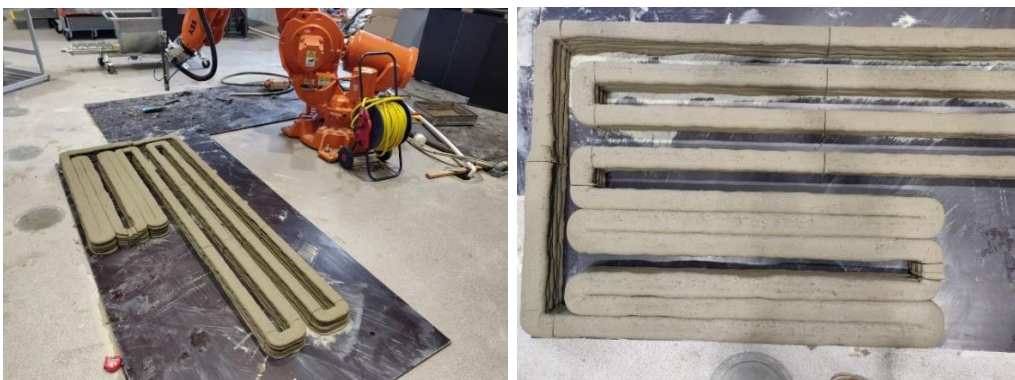
Esimese katseseeria jaoks printiti alusele 6 nelinurkset postielementi, millest pärast lõigati välja katsekehad.

Teise katseseeria juures printiti pikad seinaelemendid, et lihtsustada katsekehade väljalõikamist betoonist.

Enne printimist valmistati ette kuivsegu. Valmistati ette mudel CAD tarkvaras, mille järgi robotkäsi hakkas liikuma. Kuivsegu valmistati ette üks päev enne printimist esimesel katseseerial ja 3 päeva enne printimist teisel katseseerial. Printimise päeval paigutati valmis seadmed selliselt nagu on kujutatud joonisel 2.4.

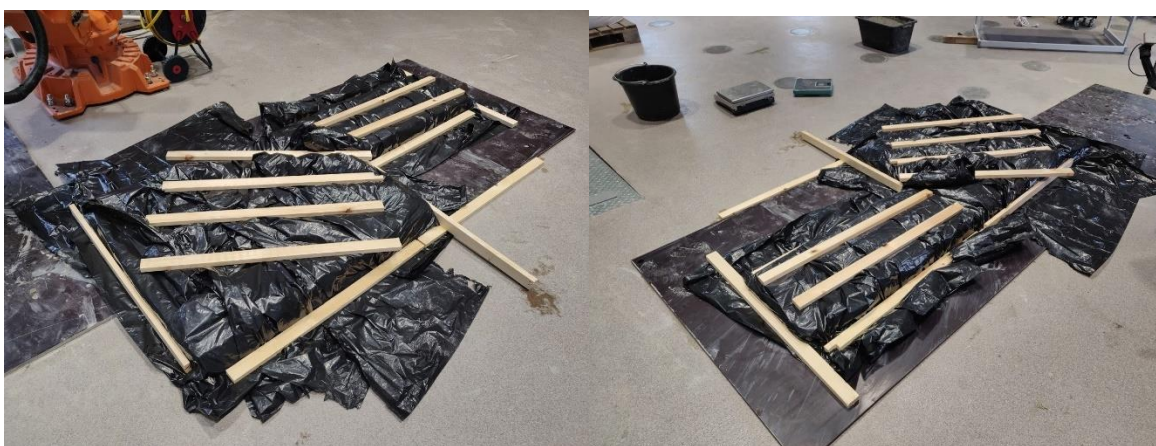
Seejärel asetati segistisse kuivsegu koos veega ja segati need omavahel kokku. Segu mahtus segistisse korraka 100 kg. Valmis segu lasti pumba kolusse, pärast mida hakati segistis uut segu ette valmistama.

Kui pump oli segu täis, pandi pump kindla kiiruse juures tööle ja hakati betooni läbi vooliku pumpama. Pumba töötamise ajal oli pumba kõrval alati üks inimene kes segu pumbas liigutas, et tagada segu homogeensus printimise ajal. Niipea kui printimistoru otsikust hakkas ühtlases koguses mörti välja voolama, anti robotkäele töökorraldus, mille järel hakkas robotkäsi ühtlase kiirusega liikuma mööda ette antud trajektoori. Printimise ajal jälgiti tähelepanelikult, et voolik oleks toetatud ning ei liiguks läbi juba printitud katsekehade, et uus segu tuleks ühtlaselt peale ja et segu voolikus ei tekiks liigseid õhuauke. Teise katseseeria puhul printiti pikad seinaelemendid ning kasutati kellut, et lõigata katsekehadesse välja 60 cm lõigud (joonis 2.5), et pärast kivistumist oleks lihtsam neid saepingile asetada ja katsekehasid välja saagida.



Joonis 2.5 Prinditud katsekehad koos katsekehadesse tehtud lõigetega

Kui katsekehad olid prinditud, eemaldati segu täis toru ja asetati kaalule, et saada kätte betooni täis vooliku mass. Pärast seda võeti välja pumba põhjast betoon, et saada kätte pumba põhja jääv betooni mass. Seejärel lasti pump ja toru rohke veega läbi, et puhastada etteande süsteem betoonisegust. Toru põhjalikuks hooldamiseks kasutati švammi ja pumba juures harja, et puhastada süsteem nii puhtaks kui võimalik. Kui voolik oli betoonist tühjendatud, kaaluti see uuesti. Seeläbi saadi kätte, kui suur on betooni kadu pumbas ja voolikus. Betooni segisti hooldamiseks lasti see üle rohke veega ja küüriti harjaga, kuni kogu kivistumata segu oli eemaldatud. Masinad jäeti õhu kätte toatemperatuuril kuivama ja katsekehad kaeti tervenisti musta kilega nagu näidatud joonisel 2.6.



Joonis 2.6 Kilega kaetud katsekehad

2.2.5 Katsekehade kivistumistingimused

Esimese seeria pooled katsekehad jäeti laboris kivistuma kile alla, kus suhteline õhuniiskus oli 100%. Teine pool katsekehades jäeti labori keskkonda, kus mõõdetud suhteline õhuniiskus ühel päeval oli 30,5%. Temperatuur mõlema tingimuse puhul oli keskmiselt 20°C. Hooldatud keskkonnas olevaid kuubikuid käidi regulaarselt niisutamas, et tagada niiske kivistumiskeskond.

Teises seerias jäeti kõigepealt kõik katsekehad kivinema õhukese kile alla (joonis 2.6), kus mõõdetud temperatuur printimise päeval oli mõõdetud 21,7°C. Pärast 24 tundi lõigati prinditud kehas välja katsekehad, mis jäeti edasi kivinema toatemperatuuril veega täidetud anumatesse. Osad katsekehad, mis veeanumasse ei mahtunud, neid käidi igapäevaselt rohke veega kastmas ja olid pidevalt musta kilega kaetud, et takistada vee väljakuivamist. Kilele, mis katsekehade peale asetati,

paigutati servadesse pikad puidust lauad ja raskused, et takistada kile alt veel välja liikumist ja kilede peale asetati täiendavalt raskust, et takistada kilede liitumiskohtadest vee välja kuivamist.

2.2.6 Katsekuubikute välja lõikamine

Esimese seeria puhul, 2 päeva möödumisel lõigati prinditud postidest välja 50 mm servaga kuubikud. Selleks kasutati saepinki, millel olid küljes fiksaatorid ja joonlaud, mille abil sai väga täpselt lõigata kindla pikkusega detaile.

Kõigepealt võeti ette postid ja asetati need treipingile ja lõigati läbi nii, et tekiks 4 seinaelementi. Seejärel seadistati saepink selliselt, et saaks välja lõigata 50 mm laiuseid kehasid. Pärast seda lõigati seinadest välja ristküliku kujuga elemendid. Järgmiseks võeti ette need ristkülikud ning lõigati kuubikuteks, kus iga kuubiku küljelt lõigati maha ka printimise käigus tekkivad ebaühtlased küljed (joonis 2.7), et saaks võimalikult ideaalilähedased ja sileda pinnaga katsekehad. Kui 50x50x50 mm kuubikud olid prinditud kehadest välja lõigatud, tähistati iga kuubik markeriga, et oleks võimalik hiljem eristada hooldatud ja hooldamata katsekehasid.



Joonis 2.7 Printimise käigus tekkiv ebatasasus kihtide vahel (foto Jürgen Tammepärg, 2022)

Esimese katseseeria puhul lõigati kuubikud välja kõigist kuuest prinditud kujundist samal päeval, kus pärast kuubikute välja lõikamist asetati hooldatud katsekehad tagasi kile alla ja niisutati neid ning hooldamata katsekehad ladustati alusele ja need jäeti kivinema labori keskkonda.

Teise seeria puhul lõigati 3. päeva katsetamiseks vajalikud katsekehad välja 24 ja 48 tundi pärast kivistumist. 7. ja 28. päeva katsekehad lõigati välja 2 päeva enne katsetust. Katsekehade välja lõikamise käigus märgiti igale elemendile peale printimise ja kihtide suunad. Välja lõikamiseks kasutati samuti fikseeritava joonlauaga saepinki, et saada võimalikult korrektsete mõõtmetega katsekehad. Pärast katsekehade välja lõikamist jäeti kõik katsekehad niiskesse keskkonda edasi kivinema.

2.2.7 Katsekehade ette valmistamine purustamiseks

Esimese seeria puhul 3., 7., 14. ja 28. päeva möödumisel teostati kuubikute purustamine. Päev varem toimus kuubikute ettevalmistamine, kus siluti ära survepinnad ja seejärel kaeti need pinnad peenmördi seguga ning peale seda asetati klaasalusele, mis oli eelnevalt puhtaks tehtud ja vormiõliga kaetud, et vähendada mördi nakkumist klaaspinnaga. Üks külg valmistati ette hommikul ja teine külg pärast lõunat. Seda tehti selleks, et anda mördile piisavalt aega tardumiseks. Õhtune katsekehade katmine tehti kuubiku vastas küljega, pärast seda jäeti kuubikud ööseks laborisse seisma.

Teise seeria puhul lihviti katsekehade pinnad kõigepealt siledaks ning märgiti seejärel uuesti ära kihtide suunad ja katsekehade orientatsioon ning nihikuga võeti katsekehade täpsed mõõdud, pärast mida kaaluti katsekehad ära. Pärast seda asetati katsekehad lauale (joonisel 2.8) ja hakati läbi viima katseid.



Joonis 2.8 Katsekehad laual vahetult enne katsetamist

Väljatõmbekatsete jaoks kasutati 60 cm pikkuseid seinaelemente, mille sisse puuriti 50 mm läbimõõduga otsaga süvis nagu on kujutatud joonisel 2.9. Kolm süvist tekitati

seina ülemisse ossa ja 3 alumisse ossa. Seejärel kaeti eraldatud pinnad epoksiidliimiga ja katsepiirkonna külge liimiti metallist detailid, millel oli tõmbekatse masinaga ühendamiseks keermestatud ava.



Joonis 2.9 Väljatõmbe katse jaoks ette valmistatud katsekehad

2.2.8 Surve-, painde-, lõhestus- ja väljatõmbe katse meetodika

Esimese seeria katsepäeval valmistati kõigepealt ette katsestend ja seadistati masin nagu on näidatud joonisel 2.10. Seejärel paigutati aparaati terasest distantstahukas, mille peale asetati katsekeha selliselt, et lihvitud pinnad olid pressiga samas sihis. Kui katsekeha oli asetatud stendi, suleti kaitseklaas ja käivitati press. Press avaldas kasvavat koormust kuubikule kuniks, kuniks kuubik purunes. Katsekeha purustamise järel fikseeris masin maksimaalse jõu ja pinge, millega kuubik purustati. Masina poolt fikseeritud tulemus dokumenteeriti nii paberile kui ka arvutisse. Seejärel kuubik eemaldati ja harjaga eemaldati purustatud katsekeha tükid masinast ja seadmesse asetati uus kuubik. Seda protsessi korrati kuni kõik katsekehad olid stendist läbi käinud. Oluline on täpsustada, et katsetatud kuubikute puhul varieerusid kuubikute koormamise suunad.

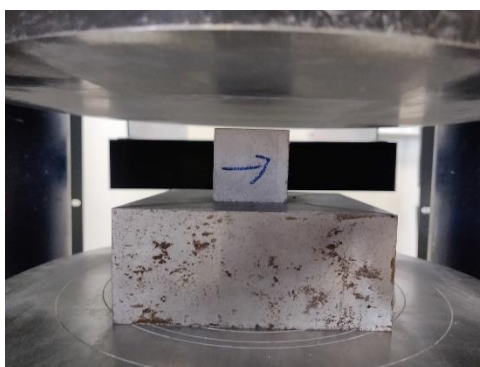
Teine katseseeria sarnanes paljuski sarnane esimesele. Peamised erinevused olid, et katsekehade purustamise hetkel oli täpselt teada, mis orientatsioonis see katsemasinasse on paigutatud. Lisaks kasutati erinevaid stende paindetugevuse määramisteks.

40 mm kuubikute jaoks kasutatav survestend nägi välja ning oli seadistatud selliselt nagu on näidatud joonisel 2.10. Katsekehade asetust stendis kirjeldab joonis 2.11.

Kõigepealt seadistati ära masina parameetrid, seejärel asetati masinasse terasest distantstahukas, mille peale pandi katsekeha. Seejärel suleti uks ja pandi masin tööle. Masin suurendas ühtlase kiirusega koormust kuni katsekeha purunemiseni.



Joonis 2.10 Survestend ja selle parameetrid. Paremal surve ja lõhestuskatsete jaoks kasutatud aparaat. Vasakul masina seadistuseks kasutatud parameetrid



Joonis 2.11 Katsekeha asetus survestendis. Noolega on tähistatud printimise suund

30x30x120 mm katsekehade paindetugevuse määramiseks kasutati paindestendi (joonis 2.12) ja katsekeha paiknemist masinas kirjeldab joonis 2.13. Selle paindekate jaoks asetati katsekeha masinasse, keerati seier algasendisse ja hakati koormama katsekeha I käiguga kuni katsekeha purunemiseni.



Joonis 2.12 30x30x120 katsekehade purustamiseks kasutatud paindestend. Üleval koormuse suuruse mõõdik. All masina käima panemise lüliti ja opereerimise lülitid



Joonis 2.13 30x30x120 mm katsekeha paiknemine katsemasinas. Noolega on näidatud printimise suund

40x40x160 mm katsekehade paindetugevuse määramiseks kasutati teistsugust paindestendi (joonis 2.14), kus katsekeha paiknemist masinas kirjeldab joonis 2.15. Kõigepealt asetati katsekeha masinasse. Seejärel lülitati masin paindekatse asendisse, keerati hüdraulilise vedeliku kraan kinni ja hakati katsekeha koormama konstantse deformeerimise kiirusega.

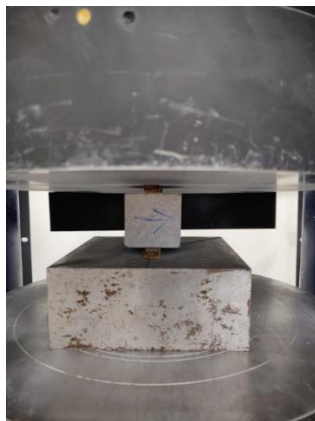


Joonis 2.14 Painde- ja survestend. Paindekatseks kasutati parempoolset osa masinast. Vasakpoolset osa masinast on mõeldud survekatsete jaoks. Mõõtmised surve plaatidel olid 40x40 mm. Fikseeritud tugevde vaheline kaugus paindekatseks oli 100 mm



Joonis 2.15 40x40x160 mm katsekeha aetus paindekatse masinas.

Lõhestuskatsete jaoks kasutati puitkiudplaadi ribasid, mis asetati klotside lihvitud külgedel tsentritesse ja katsekeha paigutust masinas kirjeldab joonis 2.16. Puitkiudplaadi ribasid kasutati, et avaldada katsekehale lokaliseeritud koormust piki kuubiku kesktelge.



Joonis 2.16 Lõhestuskatse jaoks katsemasinasse asetatud kuubik koos koormamisribadega

Väljatõmbe katsete jaoks kasutati spetsiaalset katsemasinat (joonis 2.17). Masinaga on võimalik avaldada katsekehale tõmbekoormust. Toimis selliselt, et pärast eelnevalt kirjeldatud liimimisprotsessi asetati katsekehad tasasele pinnale, katsekeha peale asetati stabiilses asendis sobiva avaga vineerist või metallist tugiplaat, mille peale paigutati katseaparaat. Läbi puidus või metallplaadis oleva avad ühendati katsekehale liimitud metalldetail katseaparaadiga. Seejärel kasutati aparati, et tekitada tõmbekoormus kuniks katsekeha enam koormust vastu võtta ei suutnud. Katse loeti ebaõnnestunuks juhul, kui andis järgi liimi kiht (joonis 2.21) või toimus purunemine katsepiirkonnast väljaspool (joonis 3.19). Õnnestunud katsekeha purunes kas kohesiivselt, ehk purunes materjal kihi sees või adhesiivselt, ehk kihtide vahelt.



Joonis 2.17 Väljatõmbe katse jaoks kasutatud seade

Katsekehade purunemispilte on näha joonistel 2.18, 2.19, 2.20. Ebaõnnestunud väljatõmbe katseid on võimalik näha joonisel 2.21.



Joonis 2.18 Survekatse tagajärjel tekkinud purustused



Joonis 2.19 Paindekatse tagajärjel tekkinud purustused



Joonis 2.20 Lõhestuskatse tagajärjel tekkinud purustused



Joonis 2.21 Ebaõnnestunud väljatõmbe katse. Purunemine toimus liimi ja katsekeha vahelt.

Pärast katsekehade purustamist võeti uuesti purustatud katsekehade massid, paigutati alusele (joonis 2.22) ja seejärel asetati need kuivatuskappi (joonis 2.23).



Joonis 2.22 Katsekehad restil enne kuivatuskappi viimist

2.2.9 Katsekehade veemavuse määramine

Veeimavus määrati 28 päeva möödumisel. Selleks võeti kõigepealt ämber ja täideti toatemperatuuril oleva veega, mille sisse asetati alles jäänud katsekehad. Kuubikud jäeti 3 päevaks veeämbrisse, pärast mida fikseeriti veega küllastunud katsekeha mass. Massi fikseerimise järel asetati katsekehad kuivatuskappi, kuhu need jäeti kuuks ajaks seisma, et tagada täielik vee välja liikumine pooridest. Kuu möödumisel võeti katsekehad kapist välja ning fikseeriti nende mass uuesti. Veeimavuse määramisel kasutatud katsekehadel survetugevust ei määratud.

Teise katseseeria puhul kaaluti katsekehad ära enne purustust, kohe kui nad olid veeämbrist välja võetud, pärast purustust ja seejärel paigutati vähemalt nädalaks kuivatuskappi. Pärast nädalast kuivatuskapis viibimist võeti katsekehade massid ja arvutati seeläbi välja katsekehade veemavus.



Joonis 2.23 Vasakult paremale: kuivatuskapi välisvaade, katsekehad kuivatuskapis, katsekehade paiknemine alusel, millega need olid kuivatuskapis.

2.3 Tugevusnäitajate määramiseks kasutatavad valemid

Survetugevuse arvutati standardi EVS-EN 12390-3:2019 [22] põhjal, täpsusega 0,1 MPa, järgmise valemiga:

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

- f_c on survetugevus, MPa (N/mm²)
- F on suurim registreeritud koormus, (N)
- A_c on katsekeha ristlõikepind, millele survejõud mõjub, (mm²)

Paindetõmbetugevuse määramiseks kasutati kolme punkti katset, mida kirjeldab joonis 2.9. Paindetõmbetugevus kolmepunktsel katsel arvutati standardi EVS-EN 12390-5:2019 [23] põhjal, täpsusega 0,1 MPa, järgmise valemiga:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

- $f_{ct,fl}$ on paindetõmbetugevus, MPa (N/mm²)
- F on maksimaalne koormus (N)
- l on alumiste rullide vahekaugus, (mm)
- d_1 ja d_2 on katsekeha ristlõike mõõtmed, (mm)

Lõhestustõmbetugevuse arvutamisel on oluline on juurde mainida, et uurimuses läbi viidud katseskeem ei olnud üks ühele sama standardis esitatud katseskeemile. Lõhestustõmbetugevus arvutati standardi EVS-EN 12390-6:2009 [24] põhjal, täpsusega 0,1 MPa, järgmise valemiga:

$$f_{ct} = \frac{3 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

- f_{ct} on lõhestustõmbetugevus, MPa (N/mm²)
- F on maksimaalne koormus (N)
- L on katsekehad kontaktjoone pikkus, (mm)
- d on ristlõike valitud mõõde, (mm)

MÄRKUS: Tugevuse arvutamisel võib kasutada katsekeha tegelikke mõõtmeid, juhul kui need erinevad standardmeetodis ette nähtud mõõtmetest. [24]

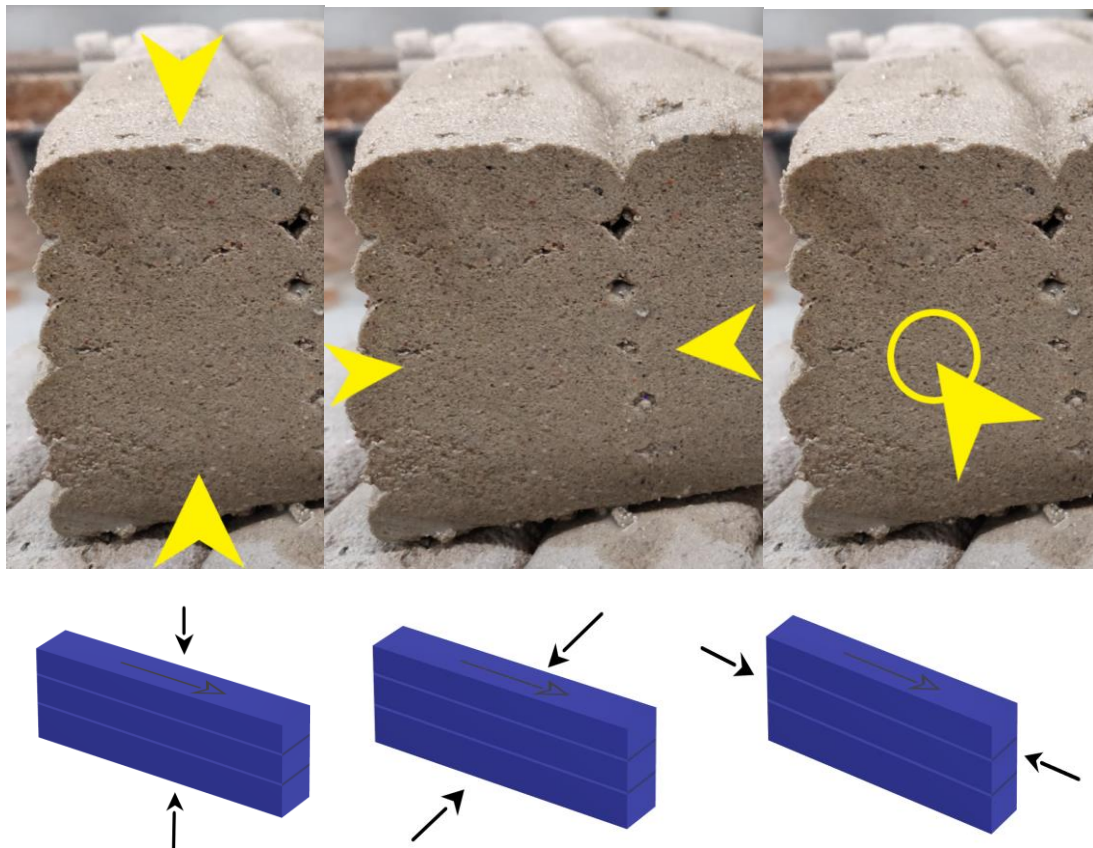
Väljatõmbe katsete jaoks eksisteerivad Eestis standardid EVS-EN 1542:2001 [25] ja EVS-EN 12504-3:2005 [26]. Antud katseid ei viidud läbi üks ühele standardis välja toodud skeemide järgi, seetõttu arvutused on tehtud vastavalt katse meetodikale, mida on näha joonisel 2.11. Prinditud betooni kihtide vahelise tõmbetugevuse, täpsusega 0,1 MPa, arvutamiseks kasutati järgmist valemit:

$$f_{ts} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

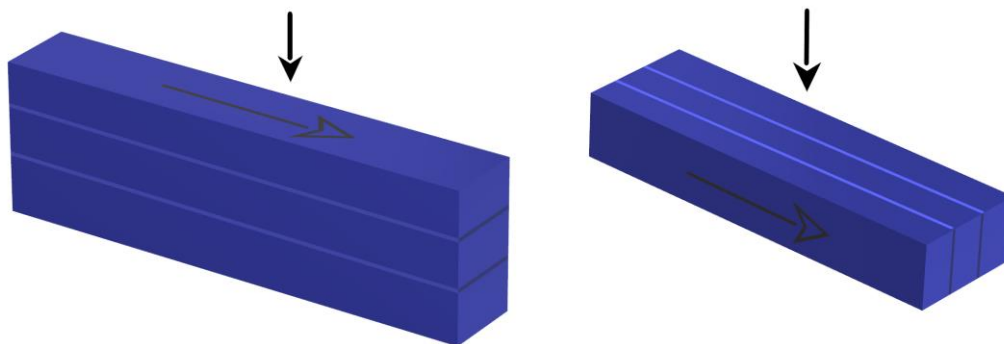
- f_{ts} on kihtide vaheline tõmbetugevus, MPa (N/mm²)
- F on maksimaalne jõud, (N)
- d on katsekeha diameeter, (mm)

3. KATSETULEMUSED

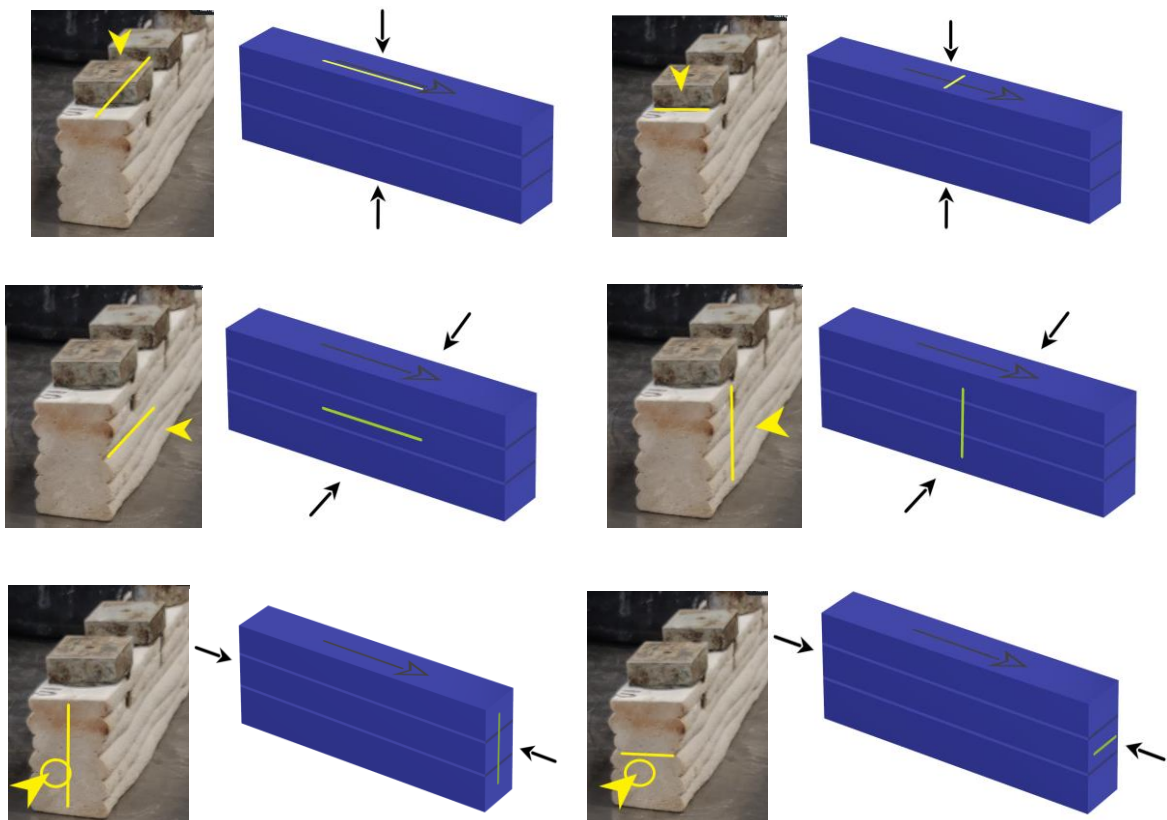
3.1 Katsekehade suundade ja piirkondade kirjeldus



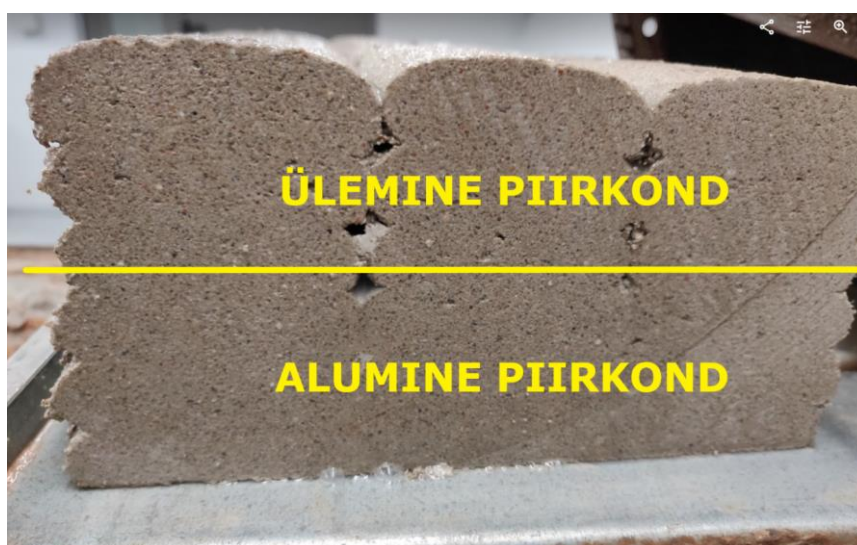
Joonis 3.1 Survekatse suunad noolega näidatud jõu mõjumise suundade järgi seina suhtes. Vasakult paremale: püsti (seina) suund, risti (seinaga) suund, piki (seina) suund. Vastavatel piltidel all, tühi nool joonistel tähistab printimise suunda ja ülemist pinda, seest täidetud nool näitab jõu rakendamise suunda.



Joonis 3.2 Painekatse suunad noolega näidatud jõu mõjumise suundade järgi seinasuhtes. Vasakult paremale: püsti (seina) suund, risti (seinaga) suund. Vastavatel pildidel all tühi nool joonistel tähistab printimise suunda ja ülemist pinda, täidetud nool näitab jõu rakendamise suunda.



Joonis 3.3 Lõhestuskatse suunad sõltuvalt noolega näidatud jõu mõju suunast ja kollase joonega näidatud lõhestuse suunast seina suhtes. Vasakul paremale, ülevalt alla: püsti-piki seina (suund 1), püsti-risti seina (suund 2), risti-piki seina (suund 3), risti-risti seina (suund 4), piki-piki seina (suund 5), piki-risti seina (suund 6). Tühi nool joonistel tähistab seina printimise suunda ja ülemist pinda, täidetud nool näitab jõu rakendamise suunda, kollased joonid tähistavad lõhestamise suunda.



Joonis 3.4 Katsekehade ülemine ja alumine piirkond

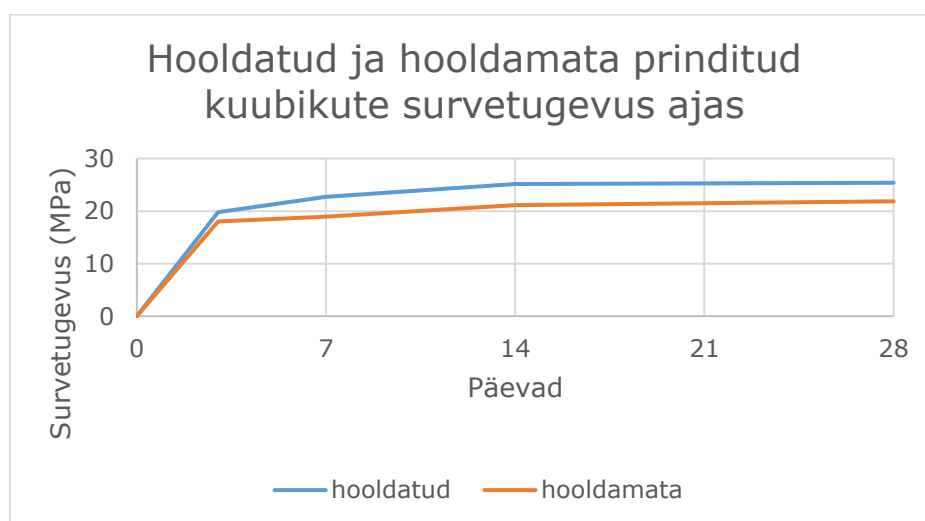
3.2 3D prinditud betoonist väljalõigatud katsekehade katsetulemused

3.2.1 I Katseseeria survekatse tulemused

3., 7. ja 14. päeval katsetati 6 hooldamata ja 6 hooldatud katsekeha. 28 päeva möödumisel katsetati 35 hooldatud ja 35 hooldamata katsekeha survele. Veeimavuse määramiseks 28 päeva möödumisel kasutati purustamata katsekehasid, millest 6 olid hooldatud tingimustes kivinenud ja 23 olid hooldamata tingimustes kivinenud.

I katseseeria tulemusena selgus, et hooldatud katsekehade tugevusnäitajad on suuremad kui hooldamata katsekehade puhul. Hooldatud katsekehade survetugevused olid 3, 7, 14 ja 28 päeva möödumisel vastavalt 8,7%, 16,4%, 16%, 15,1% tugevamad kui hooldamata katsekehade survetugevused. Kõige suurem tugevusnäitajate erinevus esines 7 päeva pärast kivistumist, mille järel hakkas tasapisi vahe kahanema. Katsekehade tugevusnäitajate võrdlust ajas on võimalik näha joonisel 3.5.

28 päeva möödumisel olid hooldatud ja hooldamata katsekehade keskmised survetugevused vastavalt 26,0 MPa ning 22,0 MPa, kus kõige suurem tulemus oli hooldatul 30,7 MPa ning hooldamata 25,3 ja madalaim tulemus oli hooldatul 14,3 ja hooldamata 15,6.



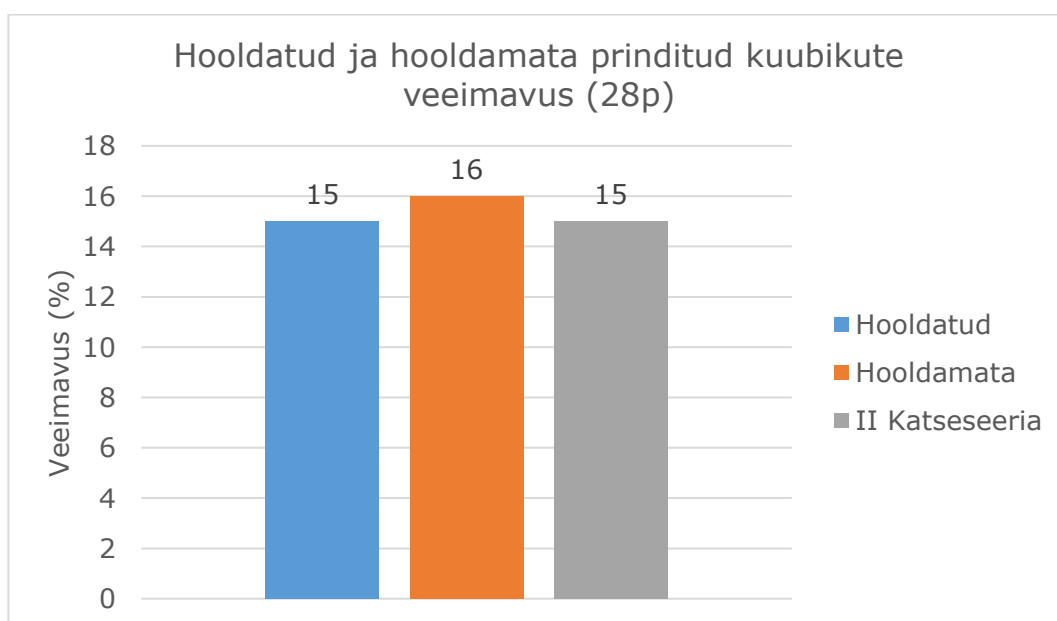
Joonis 3.5 Katsekehade keskmine survetugevuse kasvu võrdlus esimesel 28 päeval

I seeria survekatsete hooldatud katsekehade kiiremat tugevuse kasvu ajas on võimalik põhjendada erinevate kivinemiskeskcondadega. Nimelt oli kivinemisprotsessi alguses nii hooldatud kui hooldamata katsekehadel tsemendiga sidumiseks palju vett. Aja möödudes aga, hooldatud keskkonnas on vee välja liikumine betoonist takistatud tänu kilega katmisele ja regulaarsele katsekeha niisutamisele, samal ajal kui hooldamata keskkonnas ei ole vee välja liikumine betoonist takistatud. See omakorda põhjustab olukorra, kus hooldamata betoonis on tsemendil vähem vett, millega siduda end ja hooldatus on rohkem vett veel keha sees, millega tsement saab end siduda. See omakorda põhjustab rohkem reaktsioone, mis omakorda annab suuremad tugevusnäitajad katsekehadele.

Oluline on juurde mainida, et I katseseeria juures katsekehade orientatsioon katsetamise hetkel ei olnud teada, mis võib omakorda põhjustada suuremaid kõikumisi katsetulemustes.

3.2.2 I ja II katseseeria veemavuse määramise tulemused

Veeimavuse määramisel olid hooldatud ja hooldamata katsekehade keskmiste veemavuste vahe 28 päeva möödumisel 1% (joonis 3.6). Maksimaalsed tulemused olid hooldatul 15%, hooldamata 17%. Minimaalsed tulemused olid hooldatul 14%, hooldamata 15%. II katseseeria keskmine mõõdetud veemavus oli 15%.



Joonis 3.6 Keskmine katsekehade veemavus 28 päeva möödumisel I ja II katseseerias

Veeimavuste erinevust on võimalik selgitada erinevate kivinemiskeskkondadega. Nimelt hooldatud ja hooldamata puhul kivines üks niiseks keskkonnas ja teine toatemperatuuril õhu käes. II katseseeria puhul kivinesid paljud katsekehad vee all ja ülejäänud mitme kile kihi all, kus igapäevaselt käidi katsekehasid rohke veega üle kastmas, seetõttu nende veeimavused on sarnased I katseseeria hooldatud katsekehade veeimavustega.

3.2.3 II katseseeria survekatse tulemused

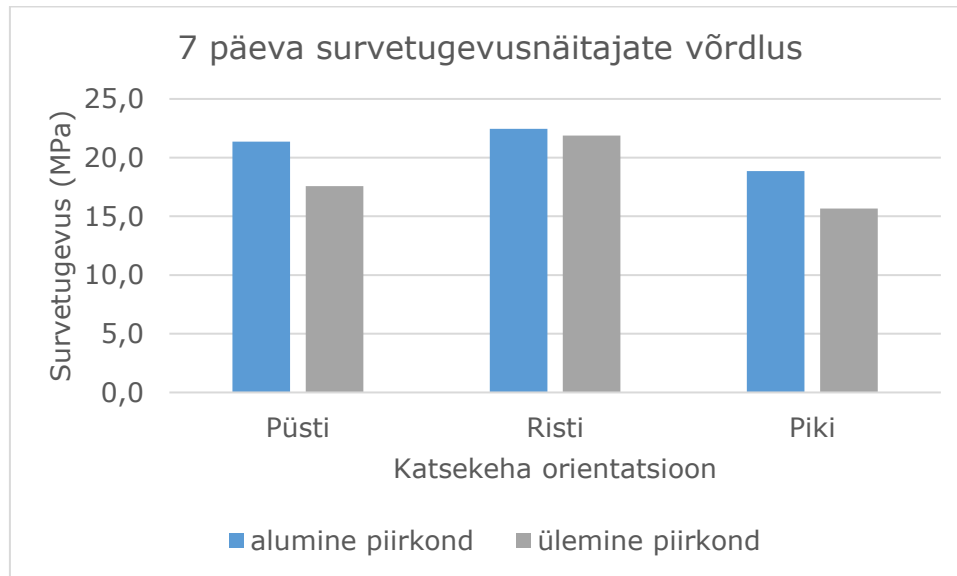
Antud uuringu suundade ja piirkondade täpsem kirjeldus on välja toodud peatükis 3.1.

3 päeva möödumisel viidi läbi katsed 12 kuubikuga, mille serva pikkus oli 40mm. Valitud katsekehade 4 olid alumisest piirkonnast, ja 8 olid ülemisest piirkonnast. Kõik katsekehad purustati seina püsti suunas.

Alumise ja ülemise piirkonna keskmised tugevusnäitajad olid vastavalt 18,0 MPa ja 11,7 MPa, kus keskmine erinevus ülemiste ja alumiste piirkondade vahel oli 65% alumise piirkonna kasuks.

7 päeva möödumisel viidi katsed läbi 24 katsekehaga, kus 12 olid alumisest piirkonnast ja 12 olid ülemisest piirkonnast. Mõlemal juhul katsetati 4 katsekeha seina püsti suunas, 4 seinaga ristisuunas ja 4 seina pikisuunas.

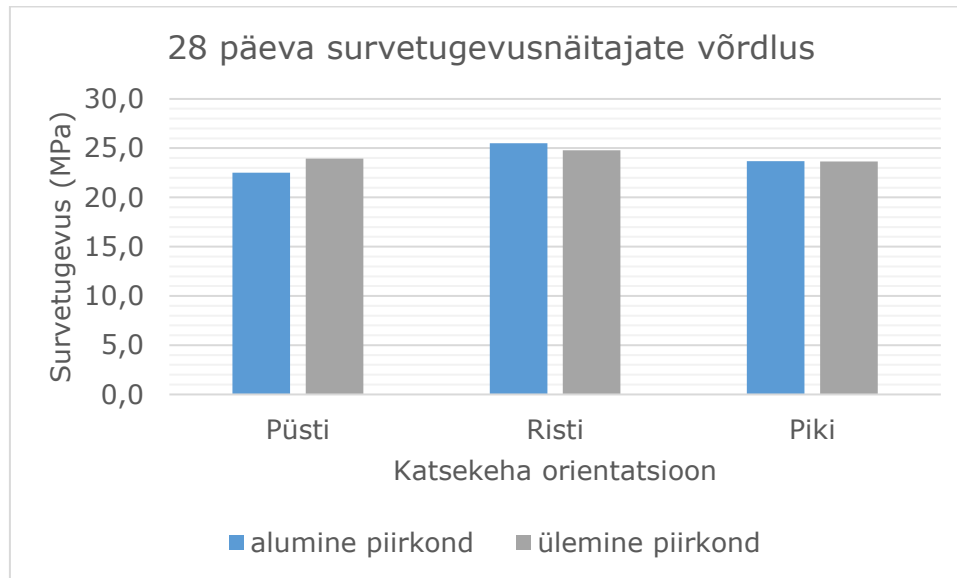
Püsti-, risti- ja piki seina suunas olid alumise ja ülemise piirkonna survetugevused vastavalt alumises piirkonnas 21,4 MPa, 22,4 MPa ja 18,8 MPa. Ülemise piirkonna tugevusnäitajad olid vastavalt 17,6 MPa, 21,9 MPa ja 15,7 MPa. Kõige suuremad erinevused esinesid seina püsti ja piki suunas katsetatud katsekehade vahel, kus erinevuse alumiste ja ülemiste piirkondade tugevusnäitajate vahel olid vastavalt 18% ja 17% alumise piirkonna kasuks. Kõige väiksem erinevus oli risti seina suunas purustatud katsekehadel, kus erinevus oli 6% alumise piirkonna kasuks. Katses läbi viidud tulemusi on graafilisel kujul võimalik näha joonisel 3.7.



Joonis 3.7 Katsekehade survetugevusnäitajate võrdlus 7 päeva möödumisel

28 päeva möödumisel katsetati 24 katsekehaga, kus 12 olid alumisest ja 12 olid ülemisest piirkonnast. Mõlemal juhul katsetati 4 katsekehad seinä püsti suunas, 4 seinaga ristisuunas ja 4 seinä pikisuunas.

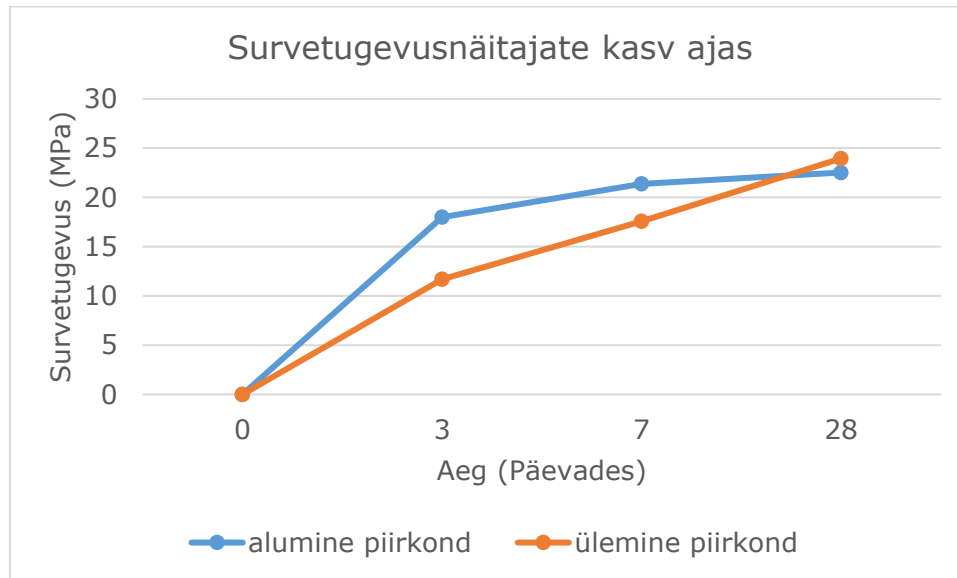
Püsti-, risti- ja piki seinä suunas olid alumise ja ülemise piirkonna survetugevused vastavalt alumises 22,5 MPa, 25,5 MPa, 23,7 MPa. Ülemise piirkonna tugevusnäitajad olid vastavalt 24,0 MPa, 24,8 MPa ja 23,7 MPa. Kõige suurem erinevus 28 päeva möödumisel esines seinä püsti asendis purustatud katsekehade vahel, kus keskmine tugevusnäitajate erinevus oli 6% ülemise piirkonna kasuks, kõige väiksem erinevus esines seinä piki suunas katsetatud katsekehade vahel, kus keskmised tugevusnäitajad olid võrdsed mõlema piirkonna vahel. Risti seinä suunas oli alumise ja ülemise piirkonna vaheline tugevuste erinevus 3% alumise piirkonna kasuks. Katsetulemusi graafilisel kujul asuvad joonisel 3.8.



Joonis 3.8 Katsekehade survetugevusnäitajate võrdlus 28 päeva möödumisel

Ajas mõõdetud tugevuse kasvu juures on joonisel 3.9 märgata, et kõige suurem erinevus alumise ja ülemise piirkonna vahel esines 3. päeval, kus erinevus oli 65% alumise piirkonna kasuks. 7 päeva möödumisel oli piirkondade vahelise tugevuse erinevus muutunud väiksemaks, kus erinevus oli 16% alumise piirkonna kasuks. 28 päeva möödumisel oli piirkondade vaheline tugevus ühtlustunud, kus erinevus oli 6% ülemise piirkonna kasuks.

7 päeva möödumisel oli ülemise piirkonna kõige madalama ja kõige kõrgema tugevusnäitajaga suuna keskmine vahe 28%. Alumise piirkonna kõige madalama ja kõrgema survetugevusega suuna tulemuste keskmine vahe oli 16%. 28 päeva möödumisel oli ülemise piirkonna kõige madalama ja kõige kõrgema tugevuse näitajaga suuna keskmine vahe 4%. Alumise piirkonna kõige madalama ja kõrgema survetugevusega suuna tulemuste keskmine vahe oli 12%.



Joonis 3.9 Printbetooni tugevus kasvude võrdlus erinevas vanuses I ja II kihis

II katseseeria survekatsete juures võib 7 päeva möödudes väiksemaid seinapikisuunas tugevuse katsetulemusi põhjendada kihtide vaheline nõrgem nake. Nimelt 7 päeva möödudes ei ole katsekehad veel saavutanud maksimaalset kihtide vahelist nakkumist. Seeläbi kui panna katsekeha seinapikisuunaliselt pressi alla, siis mingi koormuse juures kaob nake kihtide vahel ja katsekeha ei tööta enam ühe süsteemina, vaid iga kiht töötab eraldi detailina. 28 päeva möödumisel ei olnud enam seinapikisuunas katsetatud katsekehad kõige nõrgemate tugevusnäitajatega. See võib olla tingitud sellest, et kihtide vaheline nake on saavutanud sama tugevuse, mis kihi sees oleval betoonil on.

Ülemise ja alumise piirkonna tugevusnäitajate erinevust kividemiseprotsessis võib põhjendada sellega, et printimise käigus ülemised kihid pressivad alumiste kihtide peale. Ülemistest kihtidest tulenev koormus seeläbi annab kokku pressitud alumistele kihtidele suurema tiheduse, mis omakorda sunnib suuremas koguses tsementi veega reageerima, mis annab neile varakult suuremad tugevusnäitajad. See tugevuslik vahe aja möödudes kahanes, kuni 28 päeva möödudes andsid ülemiste kihtide katsekehad keskmiselt suuremad tugevusnäitajad kui alumised kihid. Seda võib põhjendada sellega, et 28 päeva möödudes oli ülemises kihis olev sideaine jõudnud veega piisavalt palju ära reageerida, et saavutas sarnased tugevusnäitajad, mis printbetooni alumised kihid.

3.2.4 II katseseeria paindetõmbekatse tulemused

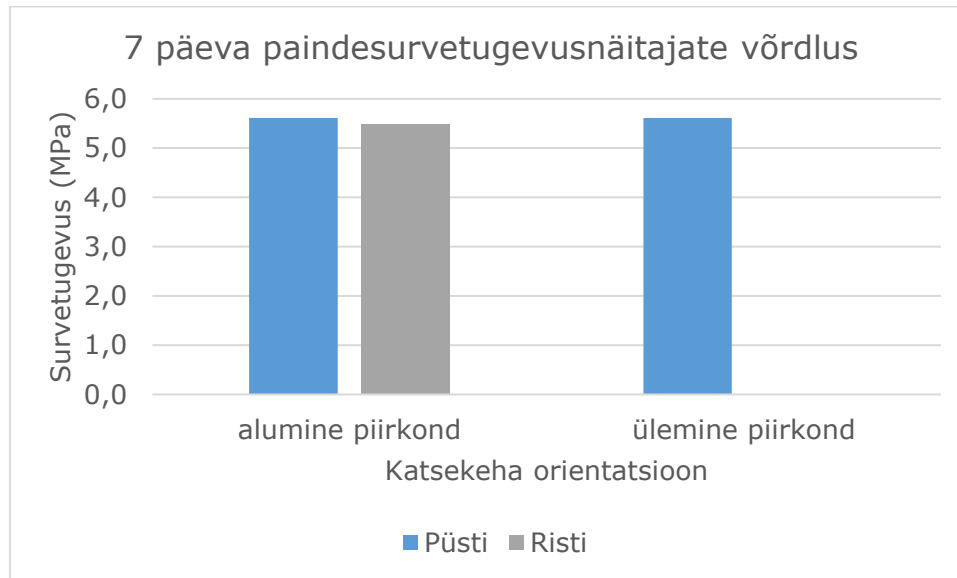
Antud uuringu suundade ja piirkondade täpsem kirjeldus on välja toodud peatükis 3.1.

3 päeva möödumisel katsetati paindele 4 katsekeha mõõtudega 40x40x160 mm. Kõik katsekehad paiknesid alumises piirkonnas

Keskmine paindetõmbetugevus katsetatud katsekehadel oli 4,8 MPa, kus kõige madalam tulemus oli 4,5 MPa ja kõige suurem oli 5,4 MPa. Kõige madalama ja kõige kõrgema tugevuse vahe oli 17%.

7 päeva möödumisel katsetati paindele 5 katsekeha mõõtudega 30x30x120 mm, millest 3 olid alumisest piirkonnast ja 2 olid ülemisest piirkonnast, kus kõik katsekehad katsetati seinä püsti suunas. 8 katsekeha mõõtudega 40x40x160 mm, millest kõik olid alumisest piirkonnast, kus 4 katsetati seinä püstisuunas ja 4 katsetati seinäga ristisuunas.

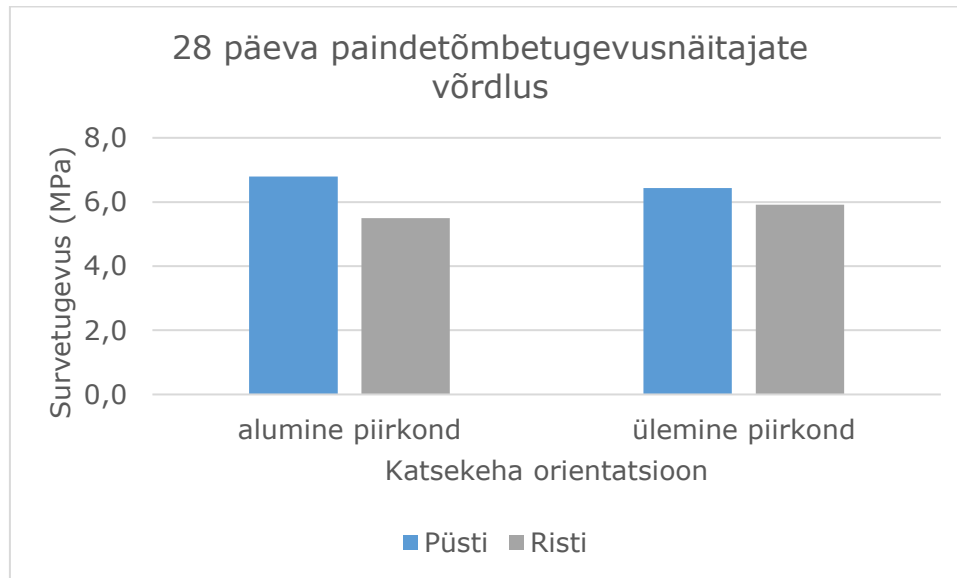
Alumisest piirkonnast katsetatud katsekehade keskmine paindetõmbetugevus oli seinä püsti suunas 5,6 MPa, kus kõige väiksem tulemus oli 5,4 MPa ja kõige suurem oli 5,8 MPa. Risti seinä suunas 5,5 MPa, kus kõige väiksem tulemus oli 5,4 MPa ja kõige suurem tulemus oli 5,6 MPa. Ülemisest piirkonnast seinä püsti suunas katsetatud katsekehade keskmine paindetõmbetugevus oli 5,6 MPa, kus kõige väiksem tulemus oli 5,5 MPa ja kõige suurem oli 5,7 MPa. Alumise ja ülemise piirkonna seinä püstisuundade tugevuste vahe oli 0%. Alumise piirkonna seinä püsti- ja risti seinä suunas katsetatud katsekehade tugevuste vahe oli 2%. Graafilisel kujul on tulemused välja toodud joonisel 3.10.



Joonis 3.10 Katsekehade paindetõmbetugevuste võrdlus 7 päeva möödumisel

28 päeva möödumisel katsetati 16 katsekeha, millest 8 olid alumisest piirkonnast ja 8 olid ülemisest piirkonnast. Mõlema piirkonna katsekehade 4 katsetati seinaga püsti suunas ja 4 seinaga ristisuunas.

Seina püsti- ja ristisuunas katsetatud katsekehadel olid keskmised paindetõmbetugevused vastavalt alumises piirkonnas seinaga püsti asendis 6,8 MPa, kus kõige madalam tulemus oli 6 MPa ja kõige suurem oli 7,2 MPa, ja seinaga risti asendis 5,5 MPa, kus kõige madalam tulemus oli 5,4 MPa ja kõige suurem oli 5,8 MPa. Ülemises piirkonnas seinaga püsti asendis 6,4 MPa, kus kõige madalam tulemus oli 6,1 MPa ja kõige suurem oli 6,7 MPa ja seinaga risti asendis 5,9 MPa, kus kõige madalam tulemus oli 5,7 MPa ja kõige suurem oli 6,2 MPa. Seinaga püsti- ja ristisuunas katsetatud katsekehade vahel oli vastavalt alumises piirkonnas 19% püsti suuna kasuks ja ülemises 8% püsti suuna kasuks. Seinaga püsti- ja risti suunas katsetatud katsekehade vahel olid vastavalt 5% alumise piirkonna kasuks ja 7% ülemise piirkonna kasuks. Graafilisel kujul on saadud tulemusi võimalik näha joonisel 3.11



Joonis 3.11 Katsekehade paindetõmbetugevuste võrdlus 28 päeva möödumisel

Paindekatsel puhul varakult ei tulnud välja olulist erinevust seina püsti ja risti suunas katsetatud katsekehade puhul, aga 28 päeva möödudes olid seina püsti suunas katsetatud katsekehad keskmiselt 19% suuremate tugevusnäitajatega, kui risti suunas katsetatud katsekehad. Üks võimalik põhjendus sellele on, et seina risti suunas katsetades esineb tõmbetsoonis kihtide vahelisel alal suurem veeimavus, mis omakorda tähendab, et tõmbetsoonis on vähem materjali, mis koormust vastu suudab võtta, seeläbi on paindekatsel ka nõrgemad tulemused. Paindekatsel seina püsti suunas on suuremat tugevusnäitajad tõenäoliselt sellepärast, et seina püsti asendis on katsekehade tõmbe tsoon palju homogeensem ja väiksema veeimavusega kui kihtide vaheline ala, mis omakorda tähendab, et tõmbetsoonis on rohkem materjali, mis koormus vastu võtab, andes seeläbi suuremad keskmised tugevusnäitajad.

3.2.5 II katseseeria lõhestustõmbekatsede tulemused

Antud uuringu suundade ja piirkondade täpsem kirjeldus on välja toodud peatükis 3.1.

3 päeva möödumisel katsetati lõhestustõmbetugevusele 4 katsekeha mõõtudega 40x40x40 mm, mis kõik olid ülemisest piirkonnast. Lõhestuskatsed viidi läbi suunas 1.

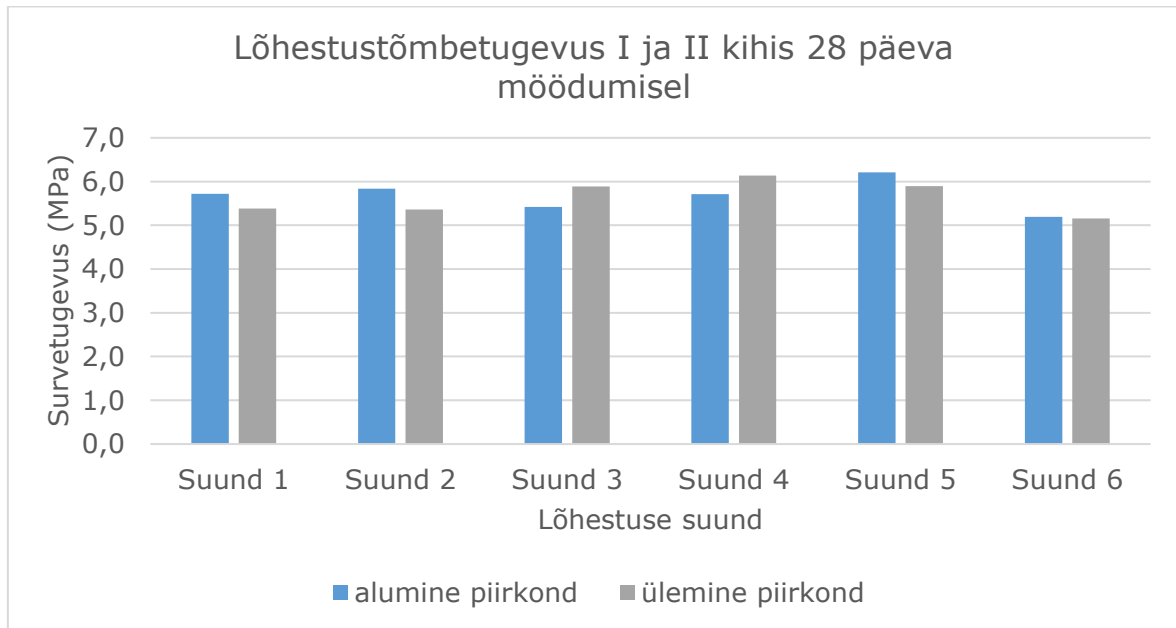
Katse käigus saadud keskmine lõhestustõmbetugevus oli 4 MPa, kus kõige madalam tulemus oli 3,2 MPa ja kõige suurem oli 4,5 MPa. Kõige madalama ja kõrgema tulemuse vahe oli 29%.

7 päeva möödumisel viidi katsed läbi 24 katsekehaga mõõtudega 40x40x40 mm, mis olid kõik võetud ülemisest piirkonnast. 24 katsekehast katsetati igas suunas 4 katsekeha.

Ülemises piirkonnas esines kõige suurem lõhestustõmbetugevuse tulemus juhul, kus lõhestamine toimus suunas 5, kus keskmine tulemus oli 5,8 MPa. Kõige väiksem tulemus olid juhul, kui lõhestamine toimus suunas 6, kus keskmine tulemus oli 4,8 MPa. Ülemise piirkonna kõige suurema ja madalama tugevusega suuna vahe oli 17%.

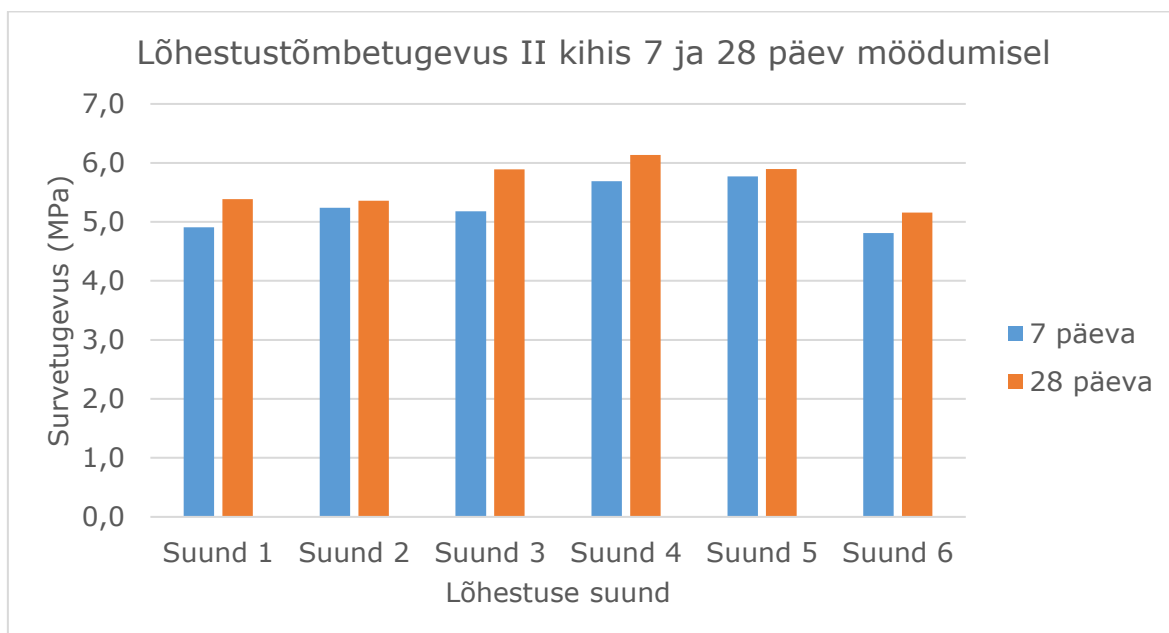
28 päeva möödumisel viidi katsed läbi 48 katsekehaga mõõtudega 40x40x40 mm, millest 24 olid alumisest piirkonnast ja 24 olid ülemisest piirkonnast. Igas suunas katsetati 4 katsekeha.

Alumises piirkonnas oli kõige suurem lõhestustõmbetugevus juhul, kui katsekeha koormamise suund oli suunas 5, kus saadud keskmine tulemus oli 6,2 MPa. Kõige väiksem lõhestustõmbetugevus oli juhul, kui lõhestamise suund oli suunas 6, kus saadud keskmine tulemus oli 5,2 MPa. Alumise piirkonna suurima ja nõrgima suuna tugevuste vahe oli 16%. Ülemises piirkonnas oli kõige suurem lõhestustõmbetugevus juhul, kui katsekeha koormati suunas 4, kus saadud keskmine tulemus oli 6,1 MPa. Kõige väiksem tulemus saadi juhul, kui koormamine toimus suunas 6, kus saadud keskmine tulemus oli 5,2 MPa. Suurima ja nõrgima tulemuse vahe ülemises piirkonnas oli 16%. Suurim erinevus alumise ja ülemise piirkonna vahel esines suunas 3, kus vahe oli 9% ülemise piirkonna kasuks. Kõige väiksem erinevus piirkondade vahel esines suunas 6, kus erinevus oli 1% alumise piirkonna kasuks. Graafilisel kujul on võimalik saadud tulemusi näha joonisel 3.12.



Joonis 3.12 Lõhestustõmbetugevuste võrdlus 28 päeva möödumisel

Ajas mõõdetud lõhestuvustõmbetugevuse kasv suunas 1 oli kõige suurem kasv esimese 3 päeva juures, kus tugevuse kasvas keskmiselt 4 MPa peale, pärast mida kasv aeglustus. Kolmandalt päevalt 7. päevale oli lõhestustõmbetugevuse kasv keskmiselt 18%. Tugevuse kasv 7. päevalt 28. päeval oli 2%. Joonise 3.13 peal on esitatud tugevuse kasv ülemises piirkonnas 7. päevalt 28. päevani. Kõige suurem tugevuse kasv esines suunas 3, kus lõhestustõmbetugevuse kasv oli 0,7 MPa ehk 12%. Kõige väiksem kasv esines suundades 2 ja 5, kus mõlemas oli kasv 0,1 MPa ehk 2%.



Joonis 3.13 Lõhestustõmbetugevuse katsete võrdlus 7 ja 28 päeva vahel

Lõhestuskatsete puhul tuli välja, et kõige nõrgemad näitajad esinevad olukordades, kus lõhestamisel jõud on suunatud piki seina kihtide vahelist ala. Nii 7 kui 28 päeva vanuselt olid nõrgemad näitajad mõlemas olukorras seal, kus jõud mõjus kihtide vahelisse alasse. See võib olla põhjendatud sellega, et kuna kihtide vahelises alas võib olla suurem veemavus, siis maksimaalne vastu võetav koormus on samuti väiksem, kuna on ristlõikes on vähem materjali, mis koormust vastu suudab võtta. Teisest küljes võib olla selgitus see, et kihtide vaheline nake on nõrgem, kui kihi sees olev betoon.

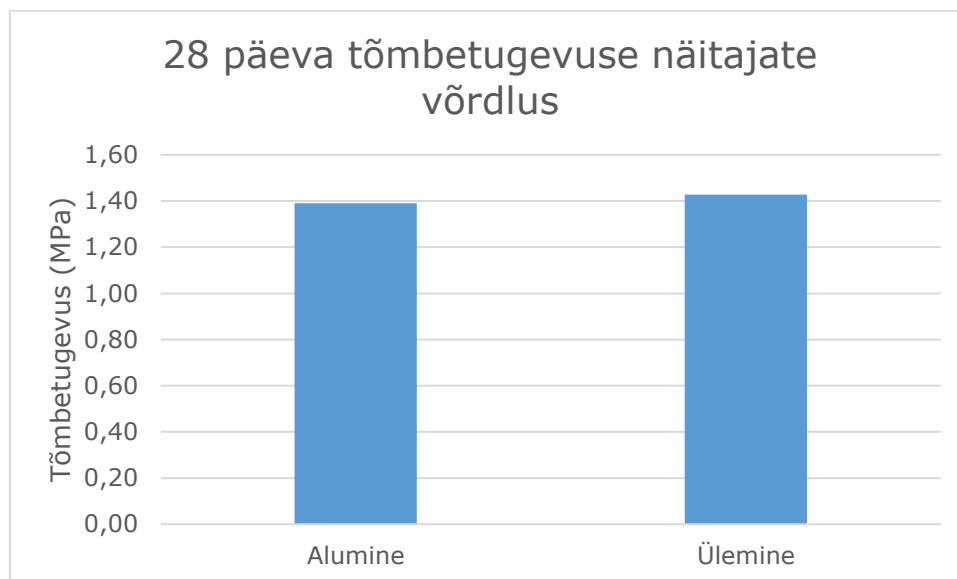
3.2.6 II katseseeria väljatõmbekatse tulemused

Antud uuringu suundade ja piirkondade täpsem kirjeldus on välja toodud peatükis 3.1.

28 päeva möödumisel viidi tõmbekatsed läbi 21 katsekehaga, millest 12 olid alumises piirkonnas ja 9 olid ülemises piirkonnas.

Ülemiste piirkondade keskmine tõmbetugevus oli 1,43 MPa, kus kõige väiksem tulemus oli 1,3 MPa ja kõige suurem tulemus oli 1,5 MPa. Alumises piirkonnas oli keskmine tõmbetugevus 1,39 MPa, kus kõige väiksem tulemus oli 1,2 MPa ja kõige suurem tulemus oli 1,6 MPa. Ülemise ja alumise piirkonna tugevuste vahe oli 3%

ülemise piirkonna kasuks. Väljatõmbe katse tulemusi on graafiliselt kujutatud joonisel 3.14.



Joonis 3.14 Tõmbetugevuse võrdlus 28 päeva möödumisel ülemises ja alumises kihis

Väljatõmbe katsete tagajärjel oli näha, et kihtide vaheline nakketugevus on 28 päeva möödumisel sisuliselt ühesugune ülemistes ja alumistes kihtides. Ühesugune oli nakketugevus ülemistes ja alumistes kihtides tõenäoliselt seetõttu, et mõlemal juhul oli piisavalt niiskust, et sideaine saaks maksimaalselt reageerida ja seeläbi tagada hea nakkumine kihtide vahel. Esines palju katseid, mis tuli lugeda ebaõnnestunuks. Seda käsitletakse lähemalt piltide analüüsi peatükis.

3.3 Katse piltide analüüs

Paindekatse seeria kolmanda suuna katsed jäid tegemata. Katse käigus mõõdeti, et betooni kadu süsteemis oli vähemalt 23 kg, millest 9 kg oli vooliku ja 14kg pumbasüsteemi kaudu. Tegelikud kaod olid suuremad, kui planeeritud, mistõttu jäid mõned katsekehad lõplikult printimata.

Joonisel 3.15 on näha, et lõhestuskatse tulemusel toimus purunemine mitut eri moodi. Kõige enam purunes katsekeha selliselt, kus katsekehasse tekkis läbiv silmaga nähtav pragu sisse või katsekeha läks täielikult pooleks. Mõningatel katsekehadel on nähtav ka purunemine, kus praod algasid kahest eri piirkonnast ning liikusid omavahel kokku ja moodustas „Y“ tähe kuju purunemisel. Säärase purunemise on tõenäoliselt põhjustanud lõhestamisel kasutatav puidust detail, mis põhjustas pragude moodustumise puidu detailide serva piirkondades. Teatud juhtudel tekkis ka selliseid purustusi, kus lisaks vertikaalsele praole tekkis ka horisontaalne pragu. Sellist pragunemist võib põhjendada jõu mõjumine lõhestuskatse ajal selliselt, et kihtide vahelises piirkonnas tekkis tõmbejõud, mis kihid üksteisest eraldas.



Joonis 3.15 Lõhestuskatse tagajärjel tekkinud purustused

Survekatsel purunenud katsekehadel, joonisel 3.16, oli kohati märgatav visuaalne erinevus purunemispiltidel. Kõige levinum purunemispilt oli selline, kus katsekeha nurkadest olid arenenud praod. Sellistel juhtudel peale purunemist katsekeha püsis kas koos või lagunes laiali. Mõningatel purunemistel oli märgata survepindadel muljutud serva, mis on tingitud katsekeha ebakorrapärast, kus välja lõigatud katsekuubik ei ole ideaalne kuup.



Joonis 3.16 Survekatsel tagajärjel tekkinud purustused

Joonisel 3.17 oleva paindekatsete puhul purunesid kõik katsekehad ootuspäraselt ühtemoodi, kus katsekeha läks keskelt pooleks.



Joonis 3.17 Paindekatsete katsekeha enne ja pärast purustamist

Joonisel 3.21 peal on ilmne, et väljatõmbekatsete puhul oli mitmeid katseid, mis õnnestusid ja mitmeid, mis kukkusid läbi. Sellistel juhtudel toimus purunemine tüüpiliselt liimi kihis. Liimi kihis toimunud purunemised, joonisel 3.18, esinesid tõenäoliselt kahel põhjuse. Ühel juhul ei olnud liim piisavalt kaua saanud kuivada. Säärases olukorras oli katsetamise ajal liim veel liiga pehme. Teisel juhul ei olnud katsekeha ja metallpinna vahel täies ulatuses nakkunud. Sellist olukorda võisid põhjustada katsekeha pinna ebatasasused, mis takistasid metalli ja katsekeha kontaktpinna kokkupuudet täies ulatuses.



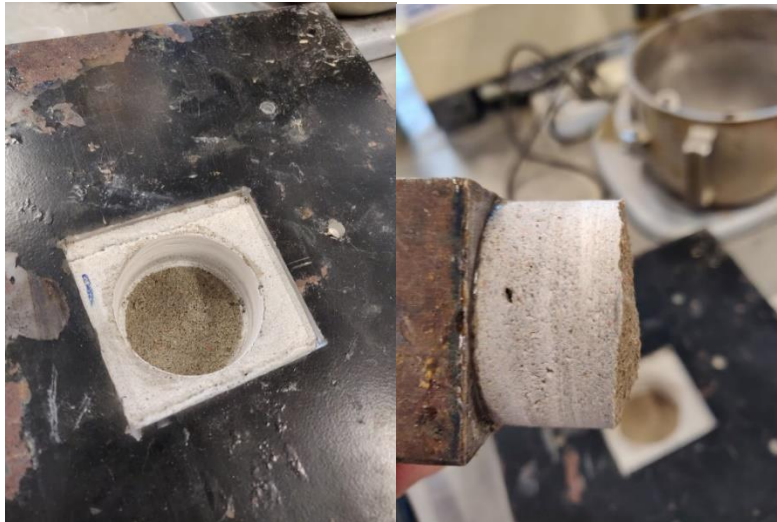
Joonis 3.18 Katsekeha purunemine liimi piirkonnast

Kahel juhul purunes katsekeha katsetatava piirkonna äärest. Sellised, joonis 3.19, purunemised toimusid juhul, kui külgnevate metall elementide peale oli asetatud metallist alusplaat. Sellisel juhul hajumise asemel koondus jõud lokaalsetesse piirkondadesse, tekitas jõuõlad, mis viisid katsekeha purunemiseni.



Joonise 3.19 Katsekeha purunemine katsetatava piirkonna kõrvalt

Õnnestunud katsete, joonis 3.20, juures toimus purunemine kõigil juhtudel kihtide vahelises piirkonnas ehk adhesiivselt. Peale purunemist oli purunenud piirkondades võimalik näha kumera kujuga pinda või nõgusa kujuga pinda. Selliseid nõgusaid ja kumeraid purunemise põhjustas tõenäoliselt printimisest tulenev omapära, kus printimise käigus kõrgemad kihid vajutavad alumiste kihtide peale, seeläbi pressides alumises kihis olevat segu väljapoole.



Joonis 3.20 Õnnestunud väljatõmbe katse



Joonis 3.21 Ülevalt alla: õnnestunud väljatõmbe katsed, ebaõnnestunud väljatõmbe katsed

Piirkondades, kus prinditi mitu seina üksteise kõrvale (joonis 3.22) on märgata kogu katsekeha pikkuses läbivaid õõnsusi, mis on tekkinud prinditavate kihtide vahele. Läbivad õõnsused on alumiste kihtide piirkondades väiksemad ja kõrgemate kihtide juures suuremad. Selliste õõnsuste kujunemise on tõenäoliselt põhjustanud printimise ajal ülemiste kihtide tekitatud koormus alumistele kihtidele, mis surusid

omaraskusega alumised kihid rohkem laiali. Kuna ülemistele kihtidele peale omaraskuse koormust juurde ei tulnud väljast poolt, siis vajusid ülemised kihid vähem laiali kui alumised.



Joonis 3.22 Kolm üksteise kõrval prinditud sein

Prinditud betoonis esines kohati ka defektseid piirkondasid, joonis 3.23, kus oli märgata fiibri kontsentratsioone, mis ei olnud kuivsegu segamisel ühtlaselt laiali jaotunud. Sellise olukorra võis põhjustada fiibri liiga kiire lisamine segusse või ebapiisav segamise aeg. Enamus purunenud katsekehade juures oli võimalik peale purunemise näha fiibri kiudusid, joonis 3.24, purunenud piirkondades. See viitab sellele, et fiiber oli ühtlaselt laiali jaotunud.



Joonis 3.23 Fiibri kontsentratsioonid prinditud betoonis



Joonis 3.24 Fiibri kiud betoonis

3.4 Järeldused

- 1) 3D printbetoonidel esineb alumiste ja ülemiste piirkondade survetugevuste vahel varajases kivistumisprotsessis suurem tugevusnäitajate erinevus, kus 3 päeva möödumisel oli erinevus 65% ehk 6,3 MPa. Aja möödumisel ülemise ja alumise piirkonna katsekehade vaheline tugevuste vahe aga ühtlustub, kus 7 ja 28 päeva vanuselt oli tugevuste vahe vastavalt 16% ja 5% ehk 3,8 MPa ja 1,4 MPa.
- 2) Uuringu käigus selgus, et prinditud betoonide tugevusnäitajad on natuke erinevad sõltuvalt, mis suunas prinditud betooni testitakse. Tugevused seinariisti- ja piki suundades erinesid seinariisti suunast vastavalt 7 päeva möödumisel 5% ja 12% ehk 1,1 MPa ja 2,5 MPa. 28 päeva möödumisel vastavalt 12% ja 5%. Paindetõmbetugevuse puhul oli 28 päeva vanusel katsekehadel märgata väike erinevus sõltuvalt, kas betooniseina koormatakse püstises asendis või ristisuunas. Tugevuse erinevus seinariisti- ja ristisuundades oli 7 päeva möödumisel 2% ehk 0,1 MPa ja 28 päeva möödumisel 19% ehk 1,3 MPa. Lõhestustõmbetugevuse juures esines väike erinevus kõige nõrgema tulemuse ja tugevama tulemuse vahel nii 7 kui ka 28 päeva möödumisel. Kõige suurema ja nõrgema tulemuse vaheline erinevus oli vastavalt 7 päeva möödumisel 15% ehk 0,9 MPa ja 28 päeva möödumisel 16%. Mõlemal juhul oli kõige nõrgem tulemuse seinariisti suunas läbi viidud lõhestumisel. Antud tulemuste põhjal võib järeldada, et uuringus kasutatud segu koostis ja printimissüsteem võimaldab printida betooni, mis kivistudes ei ole oluliselt tundlik koormamise suundade suhtes.
- 3) Hooldatud ja hooldamata betoonide veeimavuste vahe on väike. Hooldatud ja hooldamata betoonide veeimavuste vahe I katseseerias oli 1%. II katseseeria betoonide ja I katseseeria hooldatud betoonide veeimavuste vahel ei esinenud märkimisväärseid erinevusi.
- 4) Hooldatud printbetoon saavutab kiiremini suuremad tugevusnäitajad, kui hooldamata printbetoon. Hooldatud betooni tugevus oli hooldamata betoonist 3, 7, 14 ja 28 päeva möödudes suurem vastavalt 8,7%, 16,5%, 16,0% ja 15,1%.
- 5) Alumistes ja ülemistes kihtides ei esine 28 päeva möödumisel märkimisväärset erinevust kihtide vahelises nakketes, kui printimine on sooritatud ühtlase

kiirusega. Väljatõmbe katse põhjal erines alumiste ja ülemiste piirkondade nakketugevus üksteisest 3%.

Edaspidist uurimis väärub printbetooni paindetõmbetugevus seinä piki-suunalisel paindekatsel. Kuidas mõjutab kihtide vaheline printimise aeg kihtide vahelist naket. Lisaks oleks hea uurida ja võrrelda kõrgete prinditud seinade juures ülemiste ja alumiste kihtide füüsikalisi omadusi. Täiendavalt oleks vajalik uurida 2 ja 3 kihi laiuselt prinditud elemente.

SUMMARY

- 1) In 3D printed concrete, there is a greater difference in strength indicators between the compressive strengths of the lower and upper regions in the early solidification process, where after 3 days the difference was 65% or 6.3 MPa. However, as time passed, the difference in strength between the upper and lower test specimens evens out, where at the age of 7 and 28 days the difference in strength was 16% and 5%, or 3.8 MPa and 1.4 MPa, respectively.
- 2) During the research, it was revealed that the strength indicators of printed concrete are slightly different depending on the direction in which the printed concrete is tested. After 7 days the compressive strengths of the cross directional and longitudinal directions differed from the vertical direction by 5% and 12%, or 1.1 MPa and 2.5 MPa, respectively. 12% and 5% after 28 days, respectively. In terms of flexural tensile strength, there was a small difference in the 28-day-old specimens depending on whether the concrete was tested vertically or cross directionally. The difference in strength in vertical and horizontal directions was 2% or 0.1 MPa after 7 days and 19% or 1.3 MPa after 28 days. For split tensile strength, there was a small difference between the weakest and the strongest result at both 7 and 28 days. The difference between the highest and weakest results was 15% or 0.9 MPa after 7 days and 16% after 28 days, respectively. In both cases, the results were weakest for splitting in the longitudinal direction, where the force was applied parallel with the layers. Based on the results, it can be concluded that the composition of the mixture and the overall printing system used in this study enable printing of concrete that is not significantly sensitive to the direction of loading when it hardens.
- 3) The difference in porosities between treated and untreated concrete is small. The difference in porosities between treated and untreated concrete in the first test series was 1%. There were no noticeable differences between the porosities of the concretes in the second test series and the treated ones from the first test series.
- 4) Treated printed concrete reaches higher strength indicators faster than untreated printed concrete. The strength of treated concrete was 8.7%, 16.5%, 16.0% and 15.1% higher than untreated concrete after 3, 7, 14 and 28 days, respectively.

- 5) The bottom and top layers show negligible difference in interlayer adhesion after 28 days when printing at a constant speed. Based on the pull-out test, the adhesive strength of the lower and upper regions differed by 3% or 0,04 MPa.

The flexural tensile strength of precast concrete in a longitudinal bending test deserves further investigation. Furthermore, it is necessary to investigate, how does the printing time between different layers affect the interlayer adhesion. In addition, it would be good idea to study and compare the physical properties of lower and higher layers of high printed walls. Also, studying printed walls, that are 2 to 3 layers wide, could be necessary.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. M. Pogga, juhendaja T. Tuisk, "3D printimisbetooni koostise alusuuring", 2021
2. J. Tammepärg, juhendaja M. Põldaru, "Erineva ristlõikega 3D printitud betoonist konstruktsioonelementide kande võime", 2022
3. Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Will, F., Näther, M., Otto, J., & Krause, M. (2019). "Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing." *Automation in Construction*, 107, 102933.
4. Aramburu, A., Calderon-Uriszar-Aldaca, I., & Puente, I. (2022). "3D printing effect on the compressive strength of concrete structures." *Construction and Building Materials*, 354, 129108.
5. Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., Wang, L., Ding, T., Duan, Z., & Du, S. (2021). "Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities." *Cement and Concrete Composites*, 122, 104115.
6. Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). "Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders." *Materials & Design*, 100, 102–109.
7. Ji, G., Xiao, J., Zhi, P., Wu, Y. C., & Han, N. (2022). "Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates." *Construction and Building Materials*, 325, 126740.
8. Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2019). "Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion." *Cement and Concrete Research*, 119, 132–140.
9. Liu, C., Zhang, R., Liu, H., He, C., Wang, Y., Wu, Y., Liu, S., Song, L., & Zuo, F. (2022). "Analysis of the mechanical performance and damage mechanism for 3D printed concrete based on pore structure." *Construction and Building Materials*, 314, 125572.
10. Sikora, P., Techman, M., Federowicz, K., El-Khayatt, A. M., Saudi, H. A., Abd Elrahman, M., Hoffmann, M., Stephan, D., & Chung, S. Y. (2022). "Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens." *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01320.
11. Kwon, S. H., Jang, K. P., Bang, J. W., Lee, J. H., & Kim, Y. Y. (2014). "Prediction of concrete compressive strength considering humidity and temperature in the construction of nuclear power plants." *Nuclear Engineering and Design*, 275, 23–29.
12. Jin, H., Fan, X., Li, Z., Zhang, W., Liu, J., Zhong, D., & Tang, L. (2022). "An experimental study on the influence of continuous ambient humidity conditions on relative humidity changes, chloride diffusion and microstructure in concrete." *Journal of Building Engineering*, 59, 105112.
13. Ma, G., A. R., Xie, P., Pan, Z., Wang, L., & Hower, J. C. (2022). "3D-printable aerogel-incorporated concrete: Anisotropy influence on physical, mechanical, and thermal insulation properties." *Construction and Building Materials*, 323, 126551.
14. Ma, G., Buswell, R., Leal da Silva, W. R., Wang, L., Xu, J., & Jones, S. Z. (2022). "Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development." *Cement and Concrete Research*, 156, 106774.
15. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus "EVS-EN 206:2014+A2:2021"

16. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12620:2005+A1:2008 – Betooni täitematerjalid KONSOLIDEERITUD TEKST."
17. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 197-1:2011 - Tsement. Osa 1: Harilike tsementide koostis, spetsifikatsioonid ja vastavuskriteeriumid."
18. Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M., & Marchment, T. (2018). "Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*", 172, 468–475.
19. Mohan, M. K., Rahul, A. v., de Schutter, G., & van Tittelboom, K. (2021). "Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*", 115, 103855.
20. Zhang, Y., Qiao, H., Qian, R., Xue, C., Feng, Q., Su, L., Zhang, Y., Liu, G., & Du, H. (2022). "Relationship between water transport behaviour and interlayer voids of 3D printed concrete." *Construction and Building Materials*, 326, 126731.
21. Huang, X., Yang, W., Song, F., & Zou, J. (2022). "Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters. *Construction and Building Materials*, 335, 127496.
22. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus "EVS-EN 12390-3:2019 – "Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus."
23. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12390-5:2019 Kivistunud betooni katsetamine Osa 5 Katsekehade paindetõmbetugevus"
24. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12390-6:2009 Kivistunud betooni katsetamine Osa 6 Katsekehade lõhestustõmbetugevus"
25. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 1542:2001 Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Test methods – Measurement of bond strength by pull-off"
26. Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS EN 12504-3:2005 Testing concrete in structures – Part 3: Determination of pull-out force"

LISAD

Lisa 1 Varasemate tehtud uuringute tulemused

Tabel L1.1 Erineva betoonisegudega ja kivistumiskeskonnaga läbi viidud katsetulemused [12]

Table 3
Compressive strengths, ultimate strengths, and rate constants.

Mix	T (°C)	RH (%)	Strength (MPa)					S _u (MPa)	k _{Tn} (days ⁻¹)	Averaged errors ^a	
			1 day	3 days	7 days	14 days	28 days				
M1	40	80	22.1	30.9	38.5	40.9	43.0	43.8	0.966	0.699	
		60	21.6	31.6	35.9	38.9	40.1	41.2	1.097	0.204	
		40	19.3	28.1	32.2	33.0	35.2	35.8	1.174	0.323	
		100	10.9	21.3	35.1	41.8	46.9	54.0	0.248	0.623	
	20	80	12.6	23.1	33.6	40.4	43.9	48.0	0.340	0.579	
		60	12.1	23.0	30.9	37.1	39.7	43.3	0.383	0.324	
		40	11.8	19.0	25.1	31.6	34.0	34.9	0.464	1.286	
		80	7.82	19.1	27.7	37.2	41.6	50.0	0.190	0.649	
	10	60	8.47	17.6	29.1	34.2	41.6	47.3	0.211	0.826	
		40	7.39	16.3	24.7	30.0	34.6	39.8	0.228	0.141	
		40	80	17.8	26.8	31.1	34.2	36.0	36.6	0.933	0.402
			60	16.4	24.1	29.0	31.2	32.3	33.4	0.951	0.212
40	16.0		22.8	25.8	27.4	30.6	29.8	1.125	0.687		
100	9.16		17.2	28.2	35.1	39.5	44.9	0.237	0.667		
M2	20	80	10.1	17.7	25.0	31.4	34.9	37.0	0.347	0.990	
		60	9.34	15.0	24.7	27.3	31.3	33.3	0.345	1.052	
		40	9.53	16.5	23.0	26.6	28.8	30.7	0.430	0.383	
		80	6.52	16.2	22.8	30.8	35.9	42.3	0.187	0.572	
	10	60	7.06	15.0	21.8	29.1	32.8	37.3	0.227	0.523	
		40	6.23	12.0	21.8	26.8	27.0	33.2	0.220	1.255	
		40	80	13.5	22.4	25.2	27.5	31.9	31.3	0.764	0.948
			60	12.4	20.1	23.5	25.8	27.4	28.3	0.789	0.242
40	11.1		18.5	20.3	23.1	24.5	25.2	0.797	0.480		
100	6.32		15.6	24.2	28.7	33.5	40.2	0.196	0.657		
M3	20	80	6.30	13.7	22.4	25.7	30.1	35.0	0.221	0.420	
		60	5.57	14.5	20.3	23.4	26.3	31.3	0.235	0.859	
		40	5.83	12.0	18.2	21.3	24.6	27.6	0.265	0.255	
		80	4.22	10.8	19.3	23.4	28.9	37.4	0.132	0.644	
	10	60	4.58	11.6	17.4	22.8	27.4	32.6	0.168	0.306	
		40	4.44	10.8	15.9	20.1	25.3	29.1	0.182	0.552	

^a Average of regression errors for strengths.

Tabel L1.2 Segude markeeringud ja nendele vastavad koostised [12]

Concrete mix proportions used in this study.

Mix	f _c	w/b (%)	Unit Mass (kg/m ³)					WRA ^a	AEA ^b
			Water	Cement	Fly-ash	Sand	Gravel		
M1	6000 psi (41.4 MPa)	40	163	326	81.4	749	939	2.60	0.287
M2	4500 psi (31.0 MPa)	45	167	297	74.3	731	972	2.31	0.130
M3	4000 psi (27.6 MPa)	50	163	261	64.9	822	939	2.08	0.208

^a WRA: water-reducing admixture.

^b AEA: air-entraining admixture.

Tabel L1.3 Eindhoveni ülikoolis läbi viidud uuringu tulemused [8]

Test	Orientation	Interval time	Nozzle height	Dehydration	Strength [MPa]		
					μ	SD	RSD
Flexural Tension			Cast specimen		4.28	0.31	7%
Flexural Tension	I	15 s	9.5 mm	Covered	4.29	0.25	6%
Flexural Tension	II	15 s	9.5 mm	Covered	4.70	0.45	10%
Flexural Tension	III	15 s	9.5 mm	Covered	3.68	0.14	4%
Flexural Tension	III	1 h	9.5 mm	Covered	3.51	0.40	11%
Flexural Tension	III	4 h	9.5 mm	Covered	3.48	0.50	14%
Flexural Tension	III	7 h	9.5 mm	Covered	3.34	0.48	15%
Flexural Tension	III	24 h	9.5 mm	Covered	3.10	0.43	14%
Flexural Tension	III	15 s	8 mm	Covered	3.92	0.30	8%
Flexural Tension	III	15 s	11 mm	Covered	3.98	0.24	6%
Flexural Tension	III	24 h	8 mm	Covered	2.65	0.78	29%
Flexural Tension	III	24 h	11 mm	Covered	2.35	0.63	27%
Flexural Tension	III	4 h	9.5 mm	Uncovered	1.72	0.26	15%
Flexural Tension	III	24 h	9.5 mm	Uncovered	2.28	0.23	10%
Tensile Splitting			Cast specimen		4.11	0.19	5%
Tensile Splitting	I	15 s	9.5 mm	Covered	3.68	0.16	4%
Tensile Splitting	II	15 s	9.5 mm	Covered	3.72	0.32	9%
Tensile Splitting	III	15 s	9.5 mm	Covered	3.55	0.26	7%
Tensile Splitting	III	4 h	9.5 mm	Covered	3.45	0.29	8%
Tensile Splitting	III	24 h	9.5 mm	Covered	2.80	0.37	13%
Compression			Cast specimen		42.30	2.36	6%
Compression	I	15 s	9.5 mm	Covered	28.51	1.70	6%
Compression	II, III	15 s	9.5 mm	Covered	29.19	1.84	6%

Tabel L1.4 Xi'ani Ülikoolis läbi viidud 3 kihti laia ja 3 kihti kõrgete printbetoonide survetugevused [9]

Specimens	1d	4d	7d	14d	28d
Cast	22.75	31.62	33.42	35.50	47.03
Coefficient of variation	11.50%	16.57%	11.43%	12.36%	1.73%
FZ	13.28	21.54	23.62	24.44	26.87
Coefficient of variation	13.89%	12.87%	8.98%	9.68%	12.78%
FY	12.49	20.14	23.31	32.72	35.35
Coefficient of variation	11.55%	13.62%	0.55%	7.61%	10.99%
FX	9.02	19.82	21.68	26.11	28.23
Coefficient of variation	9.49%	4.42%	2.48%	5.23%	2.25%

Lisa 2 Katsetulemused

Tabel L2.1 Survekatse tulemused

Jrk	Katsekeha mõõtmed			Vanus päeva	Suund	Purus- tav koo- r- mus	Surve- tugevus	Mass	Enne kuiva- tust	Pärast kuiva- tust	Tihedus	Vee- imavus	Kõrgus
	a, mm	b, mm	h, mm			F, kN	σ , MPa	m_1 , g	m_2 , g	m_k , g	kg/m ³	%	
1	38,1	37,9	38,0	3	püsti	17,053	11,8	108,4	101,4	92,6	1976	16	II kiht
2	38,0	37,5	38,0	3	püsti	12,579	8,8	107,8	103,6	94,8	1991	16	II kiht
3	39,3	37,2	38,5	3	püsti	16,495	11,3	108,2	103,1	94,6	1922	15	II kiht
4	38,6	38,0	38,5	3	püsti	15,274	10,4	110,6	108,1	99,6	1958	15	II kiht
1.2	38,6	36,3	37,4	3	püsti	16,251	11,6	102,4	101,8	93,6	1954	16	II kiht
2.2	38,5	37,0	37,5	3	püsti	20,551	14,4	104,2	104,0	95,2	1951	16	II kiht
3.2	38,5	38,0	37,5	3	püsti	16,766	11,5	105,6	73,4	67,6	1925	11	II kiht
4.2	38,5	38,7	36,7	3	püsti	20,316	13,6	110,0	109,8	100,8	2012	16	II kiht
1.1	38,0	39,0	36,9	3	püsti	26,82	18,1	108,6	108,2	99,4	1986	16	I kiht
2.1	38,1	37,7	37,9	3	püsti	27,162	18,9	108,2	108,0	98,8	1988	17	I kiht
3.1	38,1	38,5	38,3	3	püsti	26,649	18,2	108,2	108,0	98,8	1926	16	I kiht
4.1	38,0	37,1	37,9	3	püsti	23,683	16,8	106,2	106,0	96,8	1988	17	I kiht
1.1	38,4	37,8	37,8	7	püsti	32,15	22,1	108,4	107,8	99,2	1976	16	I kiht
1.2	38,7	38,1	37,9	7	püsti	27,903	18,9	109,4	108,6	100,0	1958	15	I kiht
1.3	38,3	38,3	38,0	7	püsti	31,336	21,4	108,4	107,8	99,0	1945	16	I kiht
1.4	38,5	38,8	37,7	7	püsti	34,362	23,0	110,0	109,4	100,8	1953	15	I kiht
2.1	38,0	38,2	38,1	7	risti	34,307	23,7	109,4	108,6	100,0	1978	16	I kiht
2.2	38,2	38,3	38,1	7	risti	32,537	22,4	108,6	107,8	99,0	1948	16	I kiht
2.3	39,5	37,5	38,0	7	risti	30,261	20,2	108,6	103,6	95,2	1929	15	I kiht
2.4	38,0	37,9	38,0	7	risti	34,045	23,6	108,0	107,2	98,6	1973	16	I kiht
3.1	38,6	38,0	37,8	7	püsti	27,777	18,9	109,2	108,4	99,8	1970	16	II kiht
3.2	38,5	38,2	37,7	7	püsti	26,766	18,2	111,0	110,2	101,6	2002	16	II kiht
3.3	38,8	38,0	38,0	7	püsti	26,35	17,9	106,8	106,0	97,8	1906	15	II kiht
3.4	37,3	38,0	38,2	7	püsti	21,65	15,3	106,8	105,6	97,4	1972	15	II kiht
4.1	38,3	37,7	35,4	7	risti	35,156	25,9	101,2	100,2	92,4	1980	15	II kiht
4.2	37,2	37,8	38,5	7	risti	28,634	20,0	108,8	108,0	99,4	2010	16	II kiht
4.3	38,1	37,7	35,7	7	risti	31,751	23,3	100,4	98,8	91,0	1958	15	II kiht
4.4	38,3	37,7	37,9	7	risti	26,449	18,2	106,8	97,0	90,2	1952	12	II kiht
11.1	41,3	40,4	41,2	7	piki	31,228	18,8	136,0	135,6	124,6	1978	16	I kiht
11.2	41,1	41,2	41,3	7	piki	28,301	16,6	137,4	126,2	116,4	1965	14	I kiht
11.3	41,0	41,2	41,3	7	piki	31,425	18,5	137,0	136,8	125,8	1964	16	I kiht
11.4	40,7	41,1	41,3	7	piki	36,546	21,5	137,0	136,8	126,0	1983	16	I kiht
12.1	41,5	38,6	40,2	7	piki	22,95	14,8	126,6	126,4	116,4	1966	16	II kiht
12.2	41,3	39,4	41,2	7	piki	17,402	10,7	130,6	110,8	102,6	1948	12	II kiht
12.3	41,1	38,8	42,0	7	piki	29,682	18,2	131,2	131,2	121,0	1959	15	II kiht
12.4	41,2	39,1	41,3	7	piki	30,530	18,9	129,0	129,0	119,0	1939	15	II kiht

Jrk	Katsekeha mõõtmed			Vanus	Suund	Purustav koormus	Survetugevus	Mass	Enne kuivatust		Pärast kuivatust	Tihedus	Veeimavus	Kõrgus
	a, mm	b, mm	h, mm						m ₁ , g	m ₂ , g				
				päeva		F, kN	σ , MPa			m _k , g	kg/m ³	%		
1.1	40,9	39,9	39,0	28	püsti	38,653	23,7	121,4	121,6	111,4	1907	16	I kiht	
1.2	40,5	39,5	38,7	28	püsti	35,410	22,1	119,4	119,4	109,2	1929	16	I kiht	
1.3	41,1	41,0	40,0	28	püsti	34,623	20,5	121,8	121,8	111,4	1807	15	I kiht	
1.4	40,4	39,4	39,1	28	püsti	37,793	23,7	121,6	121,6	111,6	1954	16	I kiht	
2.1	40,0	39,7	39,1	28	risti	40,195	25,7	122,8	123,0	112,4	1978	17	I kiht	
2.2	40,2	39,4	39,2	28	risti	42,002	26,7	121,8	122,2	111,4	1962	17	I kiht	
2.3	40,0	40,0	39,4	28	risti	38,100	24,2	119,6	120,0	109	1897	17	I kiht	
2.4	40,4	40,0	39,2	28	risti	40,430	25,5	122,2	122,2	111,4	1929	17	I kiht	
3.1	39,9	39,3	38,8	28	piki	37,350	24,5	121,0	121,0	110,8	1989	17	I kiht	
3.2	39,8	39,9	39,7	28	piki	37,847	23,9	121,8	122,0	111,4	1932	17	I kiht	
3.3	40,5	39,5	39,0	28	piki	39,030	25,3	120,2	120,4	110,2	1927	16	I kiht	
3.4	40,3	40,5	39,5	28	piki	33,611	21,0	123,4	123,6	112,8	1914	17	I kiht	
4.1	40,9	38,6	40,6	28	püsti	36,871	23,4	123,4	123,6	114,6	1925	14	II kiht	
4.2	40,8	39,1	39,8	28	püsti	38,623	24,2	121,2	121,4	112,4	1909	14	II kiht	
4.3	40,2	38,0	40,0	28	püsti	36,420	23,8	117,6	117,8	109	1925	14	II kiht	
4.4	41,0	38,8	39,8	28	püsti	38,841	24,4	122,4	122,8	113,8	1933	14	II kiht	
5.1	40,5	37,9	39,2	28	risti	38,678	24,4	117,0	117,2	108,4	1944	15	II kiht	
5.2	40,5	39,1	41,0	28	risti	44,332	26,7	125,4	125,4	116,4	1931	14	II kiht	
5.3	41,0	38,9	40,5	28	risti	38,398	23,1	123,6	123,8	114,6	1914	14	II kiht	
5.4	40,6	38,1	40,5	28	risti	40,945	24,9	118,2	118,6	110	1887	14	II kiht	
6.1	41,0	39,0	40,1	28	piki	41,920	26,8	122,8	123,0	114,2	1915	14	II kiht	
6.2	40,8	38,3	40,0	28	piki	30,576	20,0	118,6	118,6	109,8	1897	14	II kiht	
6.3	40,3	38,3	39,9	28	piki	33,629	22,0	118,0	118,2	109,4	1916	14	II kiht	
6.4	40,6	39,0	40,8	28	piki	41,198	25,9	125,0	125,4	116,2	1935	14	II kiht	

Tabel L2.2 Paindetõmbekatse tulemused

Katsekeha number	Katsekeha mõõtmed			Vanus päeva	Suund	Purustav koormus F, kN	Paindetõmbe tugevus σ , MPa	Kõrgus
	b, mm	h, mm	L, mm					
1	38,3	38,5	161,7	3	püsti	1,75	4,6	I kiht
2	38,3	37,6	161	3	püsti	1,95	5,4	I kiht
3	38,6	38,5	161	3	püsti	1,75	4,6	I kiht
4	38	38,1	160,7	3	püsti	1,65	4,5	I kiht
1.1	28,4	28,8	118,7	7	püsti	1,55	5,4	I kiht
1.2	28,6	28,8	119	7	püsti	1,6	5,6	I kiht
1.3	29	29,1	118,8	7	püsti	1,6	5,4	I kiht
1.4	28,9	28,4	119	7	püsti	1,55	5,5	II kiht
1.5	28	29,1	118,8	7	püsti	1,65	5,7	II kiht
2.1	38,3	38,2	161	7	püsti	2,1	5,6	I kiht
2.2	37,5	38,4	161	7	püsti	2,15	5,8	I kiht
2.3	39,1	39,2	160,9	7	püsti	2,3	5,7	I kiht
2.4	39	38,5	160,8	7	püsti	2,2	5,7	I kiht
3.1	38,3	38,4	161	7	risti	2,05	5,4	I kiht
3.2	38,9	38	160	7	risti	2,05	5,5	I kiht
3.3	38,8	38,4	160,5	7	risti	2,1	5,5	I kiht
3.4	38,5	37,9	161	7	risti	2,05	5,6	I kiht
1.1	41,4	41,0	159,6	28	püsti	3,15	6,8	I kiht
1.2	41,1	40,2	160,3	28	püsti	2,65	6,0	I kiht
1.3	40,5	40,4	159,3	28	püsti	3,15	7,1	I kiht
1.4	40,9	40,9	159,3	28	püsti	3,3	7,2	I kiht
2.1	40,6	41,1	160,3	28	risti	2,35	5,1	I kiht
2.2	41,0	40,6	159,3	28	risti	2,6	5,8	I kiht
2.3	39,5	40,5	160,4	28	risti	2,45	5,7	I kiht
2.4	41,5	41,7	160,8	28	risti	2,6	5,4	I kiht
3.1	39,1	38,4	161,6	28	püsti	2,35	6,1	II kiht
3.2	38,3	38,4	161,0	28	püsti	2,45	6,5	II kiht
3.3	38,9	38,3	160,6	28	püsti	2,45	6,4	II kiht
3.4	37,2	38,9	160,2	28	püsti	2,5	6,7	II kiht
4.1	39,0	37,8	161,3	28	risti	2,1	5,7	II kiht
4.2	39,7	37,5	160,5	28	risti	2,3	6,2	II kiht
4.3	38,7	39,1	160,9	28	risti	2,4	6,1	II kiht
4.4	38,8	38,5	160,4	28	risti	2,2	5,7	II kiht

Tabel L2.3 Lõhestuskatse tulemused

Katsekeha number	Katsekeha mõõtmed			Vanus päeva	Katsekeha suund	Lõhestussuund	Purustav koormus F, kN	Lõhestustõmbe tugevus σ , MPa	Kõrgus
	a, mm	b, mm	h, mm						
1	38,3	39	38,4	3	püsti	piki	6,987	4,5	II kiht
2	38	37,2	39	3	püsti	piki	5,731	3,8	II kiht
3	38,1	37,8	38,2	3	püsti	piki	4,806	3,2	II kiht
4	38,3	38	37,5	3	püsti	piki	6,315	4,5	II kiht
5.1	39,5	39,6	38	7	püsti	risti	8,671	5,4	II kiht
5.2	39,8	39,6	38,5	7	püsti	risti	9,255	5,9	II kiht
5.3	39,4	40,6	38,7	7	püsti	risti	7,79	4,9	II kiht
5.4	37,4	38,4	40	7	püsti	risti	7,729	4,7	II kiht
6.1	40	38,8	39,1	7	püsti	piki	7,711	4,9	II kiht
6.2	40,2	39,2	39,1	7	püsti	piki	6,952	4,3	II kiht
6.3	39,1	37,8	39,8	7	püsti	piki	7,467	4,8	II kiht
6.4	39,9	38,7	39,7	7	püsti	piki	8,889	5,6	II kiht
7.1	38,7	38,8	39,5	7	piki	piki	9,281	5,8	II kiht
7.2	39,3	38,7	39,8	7	piki	piki	9,395	5,8	II kiht
7.3	37,6	39,2	39,9	7	piki	piki	9,517	5,8	II kiht
7.4	37,4	40	40	7	piki	piki	9,29	5,6	II kiht
8.1	38,1	39,5	39,3	7	piki	risti	7,336	4,5	II kiht
8.2	39,9	38,1	40	7	piki	risti	7,615	4,9	II kiht
8.3	39,1	38,6	39,5	7	piki	risti	8,409	5,3	II kiht
8.4	39,3	38,6	39,6	7	piki	risti	7,266	4,6	II kiht
9.1	39,5	39,7	39,6	7	risti	piki	8,863	5,4	II kiht
9.2	37,6	39,6	39,5	7	risti	piki	7,781	4,7	II kiht
9.3	39	40	37,4	7	risti	piki	8,391	5,4	II kiht
9.4	40,2	39,6	39,1	7	risti	piki	8,4	5,2	II kiht
10.1	40,2	39,2	39,5	7	risti	risti	8,993	5,6	II kiht
10.2	40	39	38,3	7	risti	risti	7,99	5,1	II kiht
10.3	40,2	39,9	38,9	7	risti	risti	10,005	6,3	II kiht
10.4	39,8	38,9	38,6	7	risti	risti	8,906	5,7	II kiht
7.1	41,1	39,0	40,5	28	püsti	piki	7,711	4,6	II kiht
7.2	41,0	37,8	39,7	28	püsti	piki	10,188	5,9	II kiht
7.3	40,3	37,5	39,6	28	püsti	piki	9,395	5,6	II kiht
7.4	41,1	39,3	40,2	28	püsti	piki	6,734	4,0	II kiht
8.1	41,0	39,2	40,0	28	püsti	risti	9,342	5,7	II kiht
8.2	41,0	38,8	40,3	28	püsti	risti	9,665	5,9	II kiht

Katsekeha number	Katsekeha mõõtmed			Vanus päeva	Katsekeha suund	Lõhestussuund	Purustav koormus F, kN	Lõhestustõmbe tugevus σ , MPa	Kõrgus
	a, mm	b, mm	h, mm						
8.3	41,0	39,8	40,0	28	püsti	risti	7,502	4,4	II kiht
8.4	40,8	38,7	40,4	28	püsti	risti	10,075	6,2	II kiht
9.1	41,3	40,2	38,5	28	risti	piki	9,403	5,6	II kiht
9.2	41,3	40,7	39,4	28	risti	piki	11,052	6,5	II kiht
9.3	41,0	40,0	39,3	28	risti	piki	9,464	5,6	II kiht
9.4	41,2	40,5	40,3	28	risti	piki	10,101	5,8	II kiht
10.1	41,0	39,9	39,0	28	risti	risti	9,988	6,1	II kiht
10.2	41,2	39,9	39,1	28	risti	risti	9,578	5,7	II kiht
10.3	41,0	40,0	39,5	28	risti	risti	10,040	6,0	II kiht
10.4	40,4	39,7	40,0	28	risti	risti	11,261	6,7	II kiht
11.1	39,0	40,2	41,0	28	piki	risti	8,261	4,9	II kiht
11.2	38,8	40,5	41,0	28	piki	risti	9,011	5,4	II kiht
11.3	40,5	40,5	41,1	28	piki	risti	8,391	4,9	II kiht
11.4	39,9	41,3	41,0	28	piki	risti	9,395	5,4	II kiht
12.1	39,2	40,3	41,1	28	piki	piki	10,930	6,3	II kiht
12.2	39,4	40,0	41,3	28	piki	piki	10,345	6,0	II kiht
12.3	39,6	40,4	40,9	28	piki	piki	10,319	6,1	II kiht
12.4	39,2	40,4	41,0	28	piki	piki	8,924	5,1	II kiht
13.1	40,9	39,7	40,0	28	püsti	piki	10,110	5,9	I kiht
13.2	41,2	39,7	40,5	28	püsti	piki	9,962	5,7	I kiht
13.3	40,7	40,2	40,5	28	püsti	piki	9,403	5,4	I kiht
13.4	40,3	39,2	40,7	28	püsti	piki	10,092	5,9	I kiht
14.1	40,4	39,5	39,9	28	püsti	risti	10,241	6,2	I kiht
14.2	40,9	39,4	40,0	28	püsti	risti	9,124	5,4	I kiht
14.3	40,3	40,3	40,8	28	püsti	risti	10,380	6,0	I kiht
14.4	40,5	39,0	38,8	28	püsti	risti	9,447	5,8	I kiht
15.1	40,8	40,4	39,7	28	risti	piki	8,374	5,0	I kiht
15.2	40,5	39,0	38,9	28	risti	piki	9,395	5,5	I kiht
15.3	40,8	40,4	39,9	28	risti	piki	10,468	6,2	I kiht
15.4	40,5	41,0	40,4	28	risti	piki	8,662	5,0	I kiht
16.1	41,0	40,6	40,3	28	risti	risti	7,310	4,2	I kiht
16.2	40,5	40,8	40,5	28	risti	risti	9,421	5,4	I kiht
16.3	40,5	40,5	39,9	28	risti	risti	10,843	6,2	I kiht
16.4	40,4	39,7	39,2	28	risti	risti	11,471	7,0	I kiht
17.1	40,8	40,9	40,2	28	piki	risti	8,008	4,6	I kiht
17.2	40,0	40,0	40,6	28	piki	risti	9,037	5,3	I kiht
17.3	39,2	38,5	40,7	28	piki	risti	8,653	5,2	I kiht
17.4	40,7	40,7	40,8	28	piki	risti	10,014	5,7	I kiht
18.1	40,5	40,5	40,7	28	piki	piki	11,052	6,4	I kiht

Katsekeha number	Katsekeha mõõtmed			Vanus päeva	Katsekeha suund	Lõhestussuund	Purustav koormus F, kN	Lõhestustõmbe tugevus σ , MPa	Kõrgus
	a, mm	b, mm	h, mm						
18.2	39,6	40,4	40,8	28	piki	piki	11,549	6,7	I kiht
18.3	40,0	39,7	40,8	28	piki	piki	10,136	5,9	I kiht
18.4	39,9	42,1	40,7	28	piki	piki	10,738	5,9	I kiht