



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**ERINEVA RISTLÕIKEGA 3D PRINDITUD
BETONIST KONSTRUKTSIOONIELEMENTIDE
KANDEVÕIME**

**THE LOAD CAPACITY OF 3D PRINTED CONCRETE
STRUCTURAL ELEMENTS WITH DIFFERENT CROSS
SECTIONS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jürgen Tammepärg

Üliõpilaskood 144442

Juhendaja: Mattias Põldaru

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.

23. mai 2022

Autor:

.....
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

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

Juhendaja:

.....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, Jürgen Tammepärg,

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

Erineva ristlõikega 3D prinditud betoonist konstruktsiooni elementide kandevõime,

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.

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **JÜRGEN TAMMEPÄRG**

Üliõpilaskood **144442**

Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peaeriala: Ehitusmajandus ja juhtimine

Lõputöö teema:

**ERINEVA RISTLÕIKEGA 3D PRINDITUD BETOONIST
KONSTRUKTSIOONIELEMENTIDE KANDEVÕIME**

The load capacity of 3D printed concrete structural elements with different cross sections

Juhendaja: **Mattias Põldaru**

mattias.poldaru@ttu.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja Kontakt (e-post või telefon) Allkiri ja kuupäev
Perekonnanimi

Lõputöö põhieesmärgid:

1. 3D prinditud betoonist suuremõõtmeliste ja laborikatsete valmistamine ja katsetamine
2. Andmete analüüs

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Mujal olemasolevate katsetulemuste läbitöötamine ja esitamine	11.01.2021
2. Uuritavate ristlõigete valik	17.09.2021
3. Eelkatse prinditud katseelemendiga	10.01.2021
4. Põhikatseseeria	31.03.2022
5. Katseandmete töötlus ja analüüs	02.05.2022
6. Lõputöö 95% ülevaatus	03.05.2022
7. Lõputöö esitamine	16.05.2022

Kokkuvõtte eesti keeles	16.05.2022
Kokkuvõtte inglise keeles	16.05.2022

Lõputööde 95% ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

03.05.2022

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

Kirjeldus	Tähtaeg
1	17.05.2021
2	17.05.2021
3	17.05.2021
4	17.05.2021
5	17.05.2021

Lõputöö esitamise tähtaeg:

23. mai 2022

Lõputöö ülesanne välja antud: 13.09.2021

Juhendaja: Mattias Põldaru

Ülesande vastu võtnud: Jürgen Tammepärg

Avalikustamise
piirangu tingimused: puuduvad

SISUKORD

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	3
SISUKORD	6
SISSEJUHATUS	8
1. Teoreetiline osa.....	9
1.1 Betooni 3D printimise tehnoloogia	9
1.1.1 Üldine kirjeldus.....	9
1.1.2 Betooni 3D printerite pumbasüsteemid	11
1.1.3 Printeri peade mõju elementide geomeetria ja prinditavusele	12
1.2 Betoonisegude mõju printimisele	14
1.2.1 Betoonisegude koostise mõju prinditavusele	14
1.2.2 Betoonisegude konsistentsi määramise meetodika	15
1.2.3 Elementide stabiilsus ja geomeetria kihilisel printimisel	17
1.3 Kivistunud 3D prinditud betooni katsed	18
1.3.1 Koormamise katsemetoodika suure- ja väiksemõõtmelistel katsekehadel.....	18
1.3.2 3D prinditud katsekehade kihtide suuna mõju kandevõimele	22
1.3.3 Varasemad suuremõõtmelised koormuskatsed	25
1.3.4 Suuremõõtmeliste katsekehade teoreetiline kandevõime.....	27
2. Katseline osa	29
2.1 Katseplaan.....	29
2.2 Katsemetoodika	29
2.2.1 Kasutatud materjalid	29
2.2.2 Kasutatud seadmed.....	31
2.2.3 Betooniprinteri kirjeldus ja parameetrid.....	31
2.2.4 Katseseeria printimise kirjeldus	32
2.2.5 Katsekehade kivistumistingimused	34
2.2.6 Katseseeria printimistehnoloogiast tingitud puudused	34
2.2.7 Katseseeria koormuskatsete meetodika.....	35
2.2.8 Koormuskatsete meetodikast tingitud ebatäpsused	37
2.3 Betooni parameetrite määramine	38
2.3.1 Betooni survetugevus olenevalt kihtide suunast	38
2.3.2 Betooni paindetõmbetugevuse määramine	39
3. Katsetulemuste analüüs.....	40

3.1	3D prinditud postide koormuskatsed.....	42
3.1.1	Postide katseline ja arvutuslik kandevõime	42
3.1.2	Postide purunemispiltide analüüs.....	44
3.2	3D prinditud seinte koormuskatsed.....	45
3.2.1	Seinaelementide katseline ja arvutuslik kandevõime	45
3.2.2	Seinte purunemispiltide analüüs.....	46
3.2.3	Seinte ja postide geomeetriliste ebatäpsuste analüüs	47
3.2.4	Elementide siirde sõltuvus koormusest	48
3.3	Betooni tugevusparameetrite määramine.....	49
3.3.1	Survetugevus ribiliste katsekehade puhul	49
3.3.2	Survetugevus siledate servadega kuupidel	50
3.3.3	Paindetõmbetugevuse määramine	52
	KOKKUVÕTE	54
	Summary	55
	KASUTATUD KIRJANDUS.....	56
	Lisad.....	59
	Lisa 1.1 Varasemate uuringute tehniline info, retseptid ja keskmised survetugevused	59
	Lisa 1.2 Varasemate uuringute tehniline info, retseptid ja keskmised survetugevused	60
	Lisa 1.3 Varasemate uuringute tehniline info, retseptid ja keskmised survetugevused	61
	Lisa 2 Katsekehade purunemispildid ja siirdegraafikud	62
	Lisa 3 Elementidest lõigatud kuupide survetugevused	72

SISSEJUHATUS

Magistritöö on jätk Mihkel Pogga poolt tehtud magistritööle "3D Printimisbetooni koostise alusuuring", mille alusel on valitud betoonisegu materjalide kogused. Segusid on mõnevõrra kohandatud vastavalt vajadusele. [1]

Teoreetilises osas käsitletakse betooniprinterite tehnoloogia ja printimissegude mõju betooni omadustele. Samuti vaadeldakse, mis on erinevat printimisbetooni ja tavabetooni katsetusmetoodika puhul. Lisaks sellele vaadeldakse varasemaid katseid nii väiksemõõtmeliste katsete puhul materjali parameetrite määramiseks, kui ka suuremõõtmeliste katsete puhul, et vaadelda kuidas prinditud betoon töötab konstruktsioonielemendis.

Töö on jaotatud osadeks: Esimeses osa eesmärgiks on määrata kandekonstruktsiooni elementide kandevõime lokaalsel tsentrilisel koormusel. Töö teises osas võetakse koormamiskatsete mittepurunenud osad ning lõigatakse nendest välja katseseeria materjali parameetrite hindamiseks.

Selle magistritöö esimeses osas uuritakse suuremõõtmeliste armeerimata 3D prinditud postide ja seinaelementide kandevõimet niisutamata ja katmata tingimustes kivistumisel. Koormus rakendatakse lokaalselt tsentriliselt elemendile kuni katsekeha purustava koormuse saavutamiseni. Katse käigus uuritakse pragude tekkimist elementides ning seinaga geomeetria muutuseid koormuse muutumisest ning analüüsitakse purunemispilte.

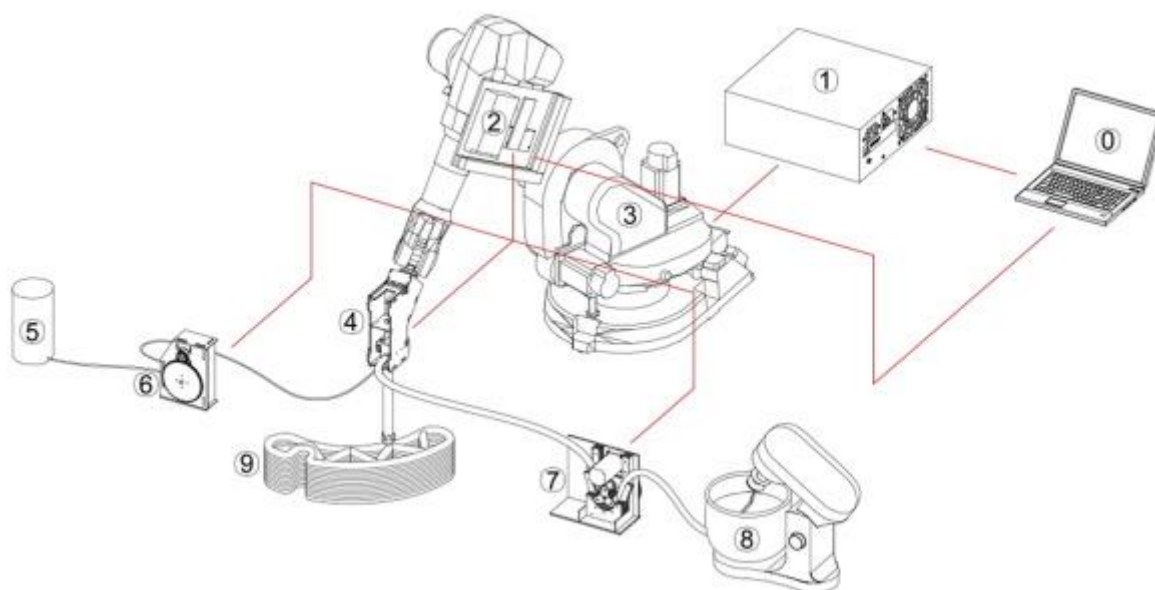
Töö teises osas uuritakse koormamise suuna mõju survetugevusele nii lõigatud kuupide, kui ribiliste servadega kuupide puhul – survetugevus määratakse nii märgades, kui õhkuivades tingimustes ning määratakse materjali poorsus ja pehmenemiskoefitsent. Lisaks eelnimetatud katsetele tehakse ka paindekatsed.

1. TEOREETILINE OSA

1.1 Betooni 3D printimise tehnoloogia

1.1.1 Üldine kirjeldus

Sarnaselt teistele kihilise printimise baasil tehtud 3D printeritele koosneb ka betooni 3D printer printimispeast, prinditava materjali etteandesüsteemist ja positsioneerimissüsteemist, mis juhib printimispead lähtuvalt printimisteekonnast ehk rajast (joonis 1.1). Prinditava objekti parameetreid mõjutab oluliselt pumba võimsus, vooliku ja printimispea läbimõõt, printimispea liikumiskiirus ja võimekus segu pideva printimise jaoks katkestuseta juurde toota. Printimiskiirus peaks olema valitud selline, et oleks tagatud pidev printimine. [2]



Joonis 1.1 Betooni 3D printeri süsteemi kirjeldus. 0. juhtimissüsteem; 1. roboti kontrolleri; 2. printeri kontrolleri; 3. robotkäsi; 4. printimispea; 5. kiirendi mahuti; 6. Kiirendi pump; 7. segupump; 8. segisti; 9. 3D prinditud keha [3]

Peamiselt kasutatakse kolme tüüpi 3D printereid – kuueteljelise robotkäe baasil olevad printerid, kolmeteljelise ristkoordinaadistikus raamiga printerid ja kraana printerid, printimispea ümber Z-telje pöörämisteljega ja ilma.

Mõned teadaolevad betooni printimis projektid kasutavad tavapäraseid tööstusroboteid. Neil on kõrge täpsus ja dünaamilisus ning neid on suhteliselt lihtne juhtida tulenevalt varem välja töötatud rakendustarkvarast. Robotkäe baasil tehtud 3D printerite

puuduseks on võrdlemisi väike tööala, mis maksimaalselt ulatub 3,9-4,7 m kaugusele horisontaalsihis, mis teeb selle sobivaks väikese mõõtmeliste elementide printimisel.[2] Probleemiks võib sellise printeri puhul olla ka telgede asetused – teatud nurkade alla ei suuda robotkäsi enda liigendeid pöörata ehk kontrollida tuleks iga konkreetse töö printitavust konkreetsetes printimisalas ja valitud robotkäe asendimuutustega. Kõrgemate elementide printimisel kasutatakse ka raame roboti tõstmiseks.

Enamus betooni printimisprojektidest kasutavad ristkoordinaadistikus telgede suunalise liikumisega 3D printereid(joonis 1.2 a). Liikumissüsteemi poolest on need lihtsad ning annavad hea ligipääsu printitavale elemendile. Tulenevalt printeri olemusest peab printimisel planeerima lisaruumi printeri telgede jaoks. Sellise printeri tööalale seab piirangud ette neljateljelise raami suurus. [2]

Kolmandaks põhiliseks 3D printeriks on mõnevõrra vähem populaarne radiaalkoordinaatidel põhinev kraanaprinteri süsteem. Selline süsteem võimaldab printida ühelt seisutasandilt kuni 8,5 m kaugusele. Tööpõhimõtte poolest kraana printer püstitatakse printitava hoone keskele, mis seab piirangud ruumide asetusele. Suureks eeliseks võrreldes teiste printeritega on väike ruumi vajadus. [2]



(a)



(b)

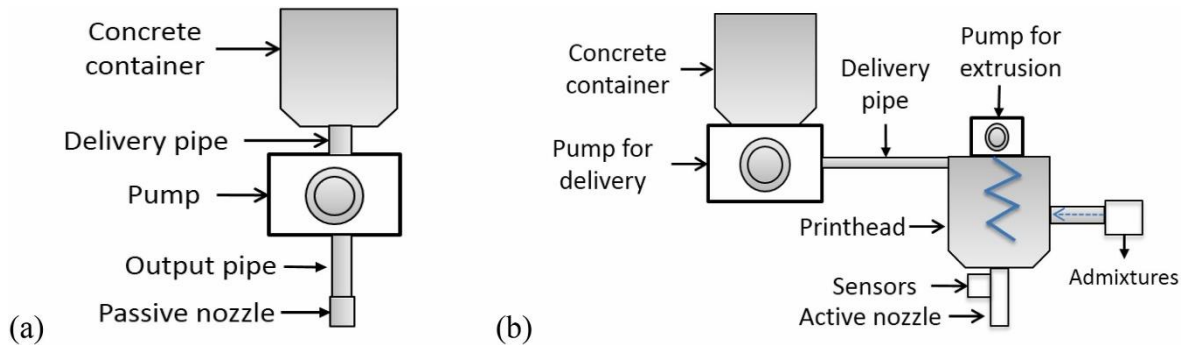


(c)

Joonis 1.2 a) Nelja teljeline raamil olev printer (TU Eindhoven, 2018); b) kuue teljelist robotkäsi kasutav printer (Concrete plans, 2018); c) radiaalkoordinaadistikus kraanaprinter (Apis Cor, 2018) [4]

1.1.2 Betooni 3D printerite pumbasüsteemid

Pumbasüsteemide poolst võime jagada betooni 3D printerid kaheks. Esimesel juhul asub ainus pump süsteemi alguses ning seda kasutatakse printimisega printimispeasse toimetamiseks ja printimiseks. Teisel juhul kasutatakse betoonisegu printimispeasse toimetamiseks ühte pumpa ning printimispeas betoonisegu printimiseks on teine pump või ekstruuder (joonis 1.3). [5]



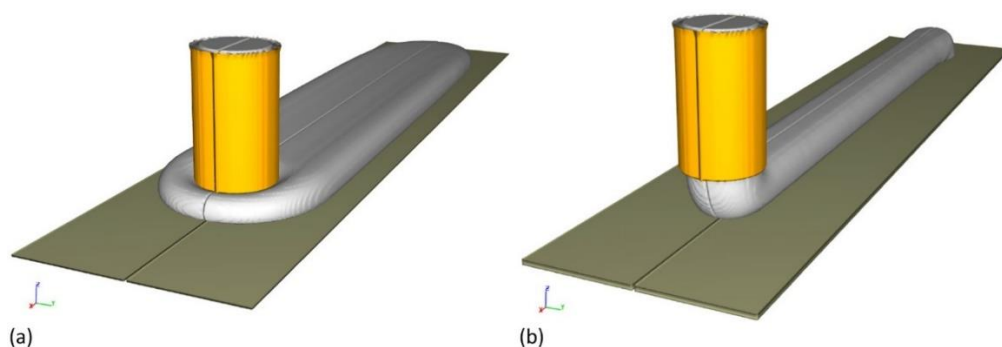
Joonis 1.3 Pumbasüsteemid a) ühe pumpaga süsteem b) kahe pumpaga süsteem [5]

Ühe pumpaga süsteemi puhul segatakse alguses betoonisegu valmis ning pumbatakse läbi vooliku printimispeasse. Betooni prinditud kihtide laius mõjutatakse pumba pöörlemiskiirusega või printeri pea liikumiskiirusega. Liiga aeglase pumpamise puhul võib tekkida probleeme kihi ühtlase laiusega ning esineb väljaprintitud segulindi rebenemist. Lisaks sellele on süsteemi suureks puuduseks printimise alustamine ja lõpetamine, sest pumba mõjutused on printimispeast kaugel ning pumba peatamine ei lõpeta kohe segu voogu, segu peatumise hilinemine sõltub peamiselt vooliku pikkusest ja elastsusest ning segu õhusisaldusest. Selline lahendus sobib hästi labori tingimustes, kus väikeste objektide printimisel on betoonisegu liin lühike. [5]

Kahe pumpaga süsteemi puhul analoogselt ühe pumba süsteemile segatakse alguses betoonisegu valmis ning pumbatakse seejärel printimispeasse. Sellise süsteemi puhul ei pea printimisega kohale toimetamise kiirus olema sünkroonis printimispea pumpamiskiirusega. Süsteemi suureks eeliseks võrreldes ühe pumba süsteemiga on printimise alustamise ja lõpetamise täpsus. Samuti ei mõjuta vooliku pikkus printimist, sest esimest pumpa kasutatakse ainult betoonisegu kohale toimetamiseks printimispeasse. [5]

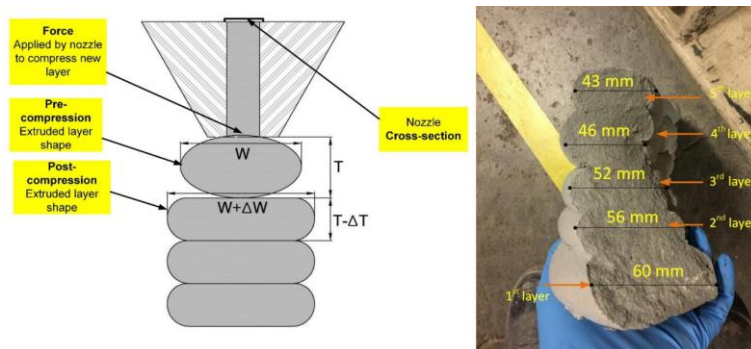
1.1.3 Printeri peade mõju elementide geometriale ja prinditavusele

Prinditud elementide geometriat mõjutavad printimise juures printimiskiirus, betoonisegu omadused, printeri tüüp ja pumpade tüüp ning täpselt sama suurt mõju avaldab printimispea asetus. Printimispea asetusega suudame me mõjutada kihilisel printimisel kihtide laiust ning kihtide arvu, mis on võimalik järjest printida. Printimispea asetus on eriti oluline kasutades ümaraid mittevormivaid printimispäid (joonis 1.4). [6] Mida madalamale me printimispeaga läheme, seda rohkem me surume eelnevat betoonikihti järgmise kihi sisse – selles tulenevalt me deformeerime rohkem alumisi kihte ning seina varisemise oht on suurem. Viimast mõjutab väga olulisel määral ka segu vooluhulk ning segu konsistents.



Joonis 1.4 Printeripea kõrguse ja segu vooluhulga mõju prinditud betooni kihtide laiusele ja kujule [6]

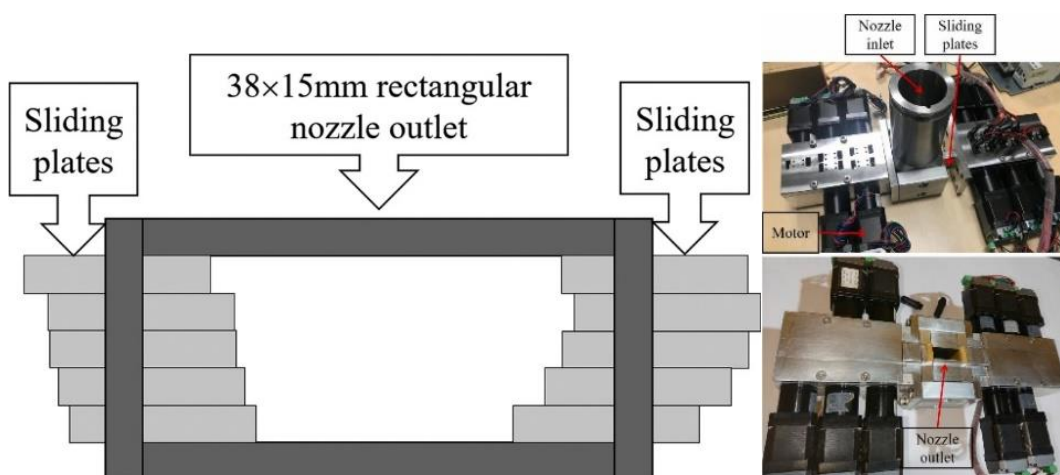
Ümarpeade kasutamine on betooni 3D printimisel lihtsam meetodika – tööpõhimõte seisneb vertikaalses torus, mille läbimõõt tuleneb pumba jõudlusest, vooliku pikkusest ja diameetrist. Elemendi printimisel suunamuutused trajektooris ei tekita mingisuguseid komplikatsioone võrreldes ekstruuder peadega. Prinditud kihid on ovaalse kujuga, selle tulemusena ülemised kihid on kõrgemad ja kitsamad ning alumised kihid vajuvad koormuse all mõnevõrra kokku ning jäävad laiemad (joonis 1.5). [7]



Joonis 1.5 Ümarpeaga printimise tööpõhimõte ja ristlõige [7]

Ekstruuder peade kasutus üheteljelisel printimisel on samamoodi lihtsutatud nagu ümarpeaga printimine. Ruumilise printimise jaoks on ekstruuderpeadega vaja pöörde kohtadel pead pöörata. Selle jaoks kasutatakse kahte varianti – kas muudetava kujuga printeri pead, mis võtab arvesse pööretel ristlõike muutuseid või täiendavalt pööratavat pead.

2021 aastal tehti uuring printimispeade mõjust prinditud betooni pinnakvaliteedile, mis rääkis ka muudetava ristlõikega ekstruuder peadest. Prinditava elemendi geomeetria määramiseks sellise printeri peaga pandi paika CADi mudeli järgi iga välispunkti asetus ruumis. Ristlõige määrati vaadates CADi mudelist tihedalt võetud lõikeid. Kui kõikide punktide asukoht ruumis oli määratud, saadeti printimispea kontrolleriile elemendi astusest info, misjärel see reguleeris vastavalt mootoritega väljalaske ava geomeetriat (joonis 1.6). [9]



Joonis 1.6 Muudetava kujuga printeri pea [9]

Teiseks variandiks ekstruuder peade puhul on pööratavad printeri pead. Selle jaoks on printeri pea küljes mootoriga pööratav printimispea, mida on võimalik pöörata vastavalt printimisteeconna sihile.

1.2 Betoonisegude mõju printimisele

Betooni printimise jaoks olevad betoonisegud peavad olema väikse valguvusega, samas peavad need olema ka pumbatavad. Mida pikemaks läheb printimisteed, seda vedelam peab olema segu või suurem pumba jõudlus. Samas mida vedelam on segu, seda vähem kihte on võimalik järjest printida.

1.2.1 Betoonisegude koostise mõju prinditavusele

Tavalised 3D printimise segud koosnevad peentäitematerjalist, tsemendist, veest ja lisanditest – kiirendi, veehoidvust suurendav lisand, superplastifikaator ja/või fiiber. Samuti on tehtud uuringuid pinnase printimise kohta, kus kasutatakse ehitusplatsilt välja kaevatud kasvupinnast täitematerjalina. Märtsis 2022 aastal tehtud uuringus selgus, et pinnasega prinditud katsekehade keskmine survetugevus saadi 2,3 MPa, mis on tunduvalt nõrgem, kui tavapärasel betooni printimisel. Konkreetse segu printimisel kasutati lubisideainet. Kui konstruktsiooni ristlõigete mõõtmetele piiranguid ei seata on selliselt võimalik printida väiksekorruselisi hooneid. [10]

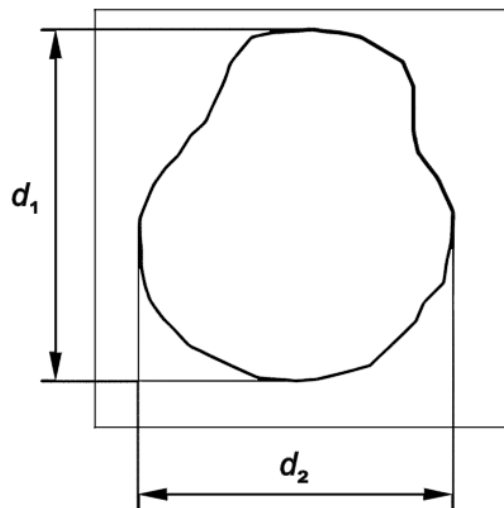
3D printimissegude täitematerjaliks on tavaliselt peeneteraline liiv. Mida peenemat liiva kasutada, seda suuremaks läheb liiva eripind, see omakorda suurendab veevajadust betoonisegus. Samas mida suurem tühiklikkus on betoonisegus, seda rohkem on sidumata vett ning sellega suureneb betoonisegu töödeldavus ja väheneb tihedus ja veehoidvus.

Printimissegus kõige tähtsamateks lisanditeks on kiirendi, superplastifikaator ja fiiber. Kiirendi võimaldab betoonisegu pidevat printimist. Kihilise printimise puhul tahame, et alumised kihid hakkaks juba varakult kivistuma, et alumiste kihtide laiali valguvus võrreldes ülemiste kihtidega oleks minimaalne. Superplastifikaatorit nagu ka tavaliste betoonisegude puhul lisatakse veevajaduse vähendamiseks, et hoida vesitsement tegurit madalana. Fiiber võimaldab kihilisel printimisel printida rohkem kihte korraga ning aitab betoonisegu kiire väljakuivamise puhul pragude tekke vastu ning aitab betooni mahukahanemisest tingitud pragude vastu.

1.2.2 Betoonisegude konsistentsi määramise meetodika

3D printimise betoonisegude konsistentsi määramiseks enamkasutatavad meetodid on valguvuskatse ja vajumiskatse. Vajumiskatse puuduseks on printimissegude väga väikesed vajumid, seega on raske määratleda segude konsistentsi vajumi põhjal. Betoonisegu tardumisaja määramiseks on kasutatud Vicat' katset.

Valguvuskatse puhul määratakse betoonisegu laialivalguvust. Selle jaoks kasutatakse koonust mõõtmetega 100x70x50 mm, mis täidetakse kahes kihis. Igat kihti tihendatakse tambitsaga kergelt tampides 10 korda. Vajaduse korral võib pärast teise kihi tampimist betoonisegu lisada, et koonus oleks kuhjaga täidetud. Pärast vormi täitmist silutakse pealmine pind ära ning vorm eemaldatakse. Seejärel tehakse lööklauaga 15 lööki kord sekundis. Pärast valitud arvu lööke mõõdetakse kahes sihis, kui palju on betoonisegu laiali valgunud. [11]



Joonis 1.8 Valguvuse mõõtmine [11]

Valguvus f leitakse valemiga:

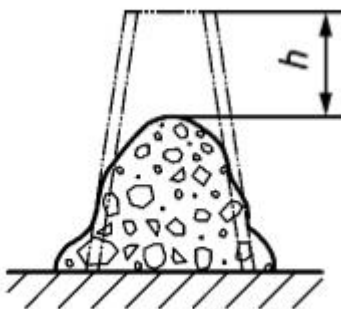
$$f = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

kus

d_1 on betoonisegu valguvuse maksimaalne mõõde, mis on paralleelne ühe laua servaga

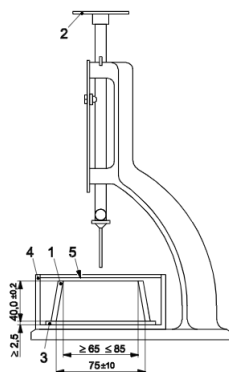
d_2 on betoonisegu valguvuse maksimaalne mõõde, mis on paralleelne laua teise servaga

Vajumiskatse puhul hinnatakse betooni töödeldavust betoonist koonuse vajumise alusel. Selle jaoks kasutatakse koonust mõõtmetega 200x100x300 mm. Koonus täidetakse betooniseguga kolmes kihis ning iga kihti tihendatakse tihendamisvardaga 25 korda. Löögid jaotatakse ühtlaselt üle iga pinna kihi. Keskmise ja ülemine kiht peavad löögid läbima üle kogu kihi tungides ka allpool olevasse kihti. Enne ülemise kihi tihendamist täidetakse vorm kuhjaga ning silutakse pealmine pind ära. Seejärel koonus eemaldatakse ning asetatakse betoonisegu kuhila kõrvale. Vajum mõõdetakse Abramsi koonuse ülapinna ja betoonikuhila ülapinna vahel. [12]



Joonis 1.9 Vajumi mõõtmine [12]

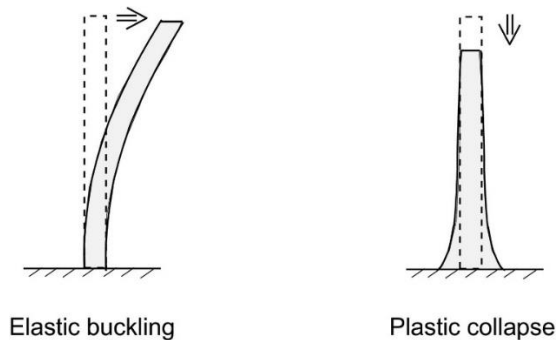
Sarnaselt tsemendi katsetamisega on kasutatud printimissegu tardumisaja määramiseks Vicat seadet. Vicat seade koosneb statiivist mille küljes teadaoleva massiga keha külge on kinnitatud nõel, mida on võimalik hetkeliselt vabastada ning koonusest kuhu sisse pannakse betoonisegu (tavaliselt tsemendipasta). Vorm pannakse segu täis liigselt tihendamata, võimalikud poorid tasandatakse koputustega nii, et pealispind jääks sile. Seejärel asetatakse nõel kontakti mördi pinnaga ning vabastatakse. Katset korratakse sobivate vaheaegade järel, näiteks iga 10 minuti tagant. Tardumine määratakse lõppenuks, kui nõela vajum on alla 0,5 mm. [13]



Joonis 1.10 Vicat' seade [13]

1.2.3 Elementide stabiilsus ja geometria kihilisel printimisel

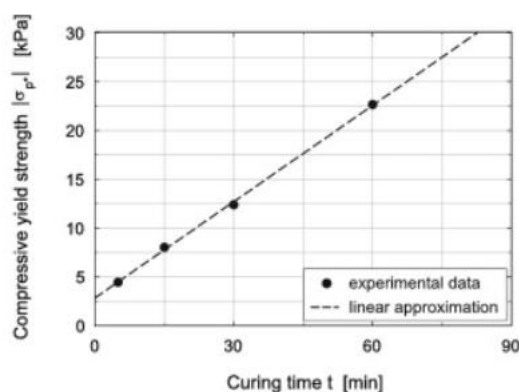
Kihilisel printimisel tulenevalt printimise tehnoloogiast ja betoonisegu omadustest esineb meil kaks peamiselt kaks purunemispilti, kas tekib stabiilsuskadu kihtide arvust ja printimise ebatäpsustest või ületatakse kihi kandevõime tulenevalt materjali omadustest (joonis 1.11).



Joonis 1.11 Kihilise printimise ajal tekkida võiv purunemispilt stabiilsuse kadumise (vasakul) ja betoonisegu kihi kandevõime ületuse tõttu (paremal) [14]

Eindhoveni ülikoolis tehtud uuringus selgus, et kivinemise aeg ja survetugevus on kivinemise alguses lineaarses sõltuvuses (joonis 1.12). Tänu sellele on võimalik üsna täpselt analüüsida, kui palju kihte on võimalik järjest printida ning kui suured peaksid olema ooteajad järgmiste kihtide printimiseks. Samuti selgus uuringust, et sirgete seinalõikude puhul kihtide vahelised ebatäpsused olid stabiilsuskao seisukohast väikese tähtsusega, mistõttu võib neid ignoreerida. [14]

Sama uuring kirjeldab, et värsket betooni kivinemise mõju materjali elastsete ja plastsete omaduste muutumisele ajas saame kirjeldada läbi viie parameetri: algelastsusmoodul, Poissoni tegur, esialgne voolavuspiir, kivinemiskiirusest tingitud voolavuspiir ja kivinemiskiirusest tingitud elastne jäikus. [14]



Joonis 1.12 Surve voolavuspiiri ja kivistumis aja vaheline seos [14]

1.3 Kivistunud 3D prinditud betooni katsed

3D prinditud segude uurimiseks prinditakse katsekehad ning nendest lõigatakse välja tulenevalt elemendi geometriast kuubid või prismad. Kuna prinditud kihi laius määrab kuupide puhul ära võimaliku katsekehade laiuse, siis pole katsekehad enamasti standardmõõdus, samuti erinevad uurimustes betoonisegude koostised ja printimistehnoloogia. Sellest tulenevalt on raske võrrelda erinevate uurimuste tulemusi üksteisega – küll aga saab võrrelda seoseid, millises koormamise sihis on katsekehad tugevamad, kas printimise tehnoloogia mõjutab kuupide tugevust ning kas standard tingimustes kuubid on tugevamad kui 3D prinditud elemendid.

1.3.1 Koormamise katsete meetodika suure- ja väiksemõõtmelistel katsekehadel

Väiksemõõtmeliste koormuskatsete meetodika:

„EVS-EN 12390-1:2021 Kivistunud betooni katsetamine Osa 1: Kuju mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded“ sätestab ära katsekehade mõõtmed. [17] Tulenevalt 3D prinditud seinade kihtide laiusest ei ole võimalik meil tihti standardile vastavaid katsekeha mõõte saavutada. Sellest tulenevalt lõigatakse katsekehad mõõtudelt mõnevõrra väiksemad, kui standardis sätestatud.

Paindekatsed teostatakse vastavalt „EVS-EN 12390-5:2019 Kivistunud betooni katsetamine osa 5 Katsekehade paindetõmbetugevus“ [24] järgi, kas kolme või neljapunkti paindekatsel (joonis 1.13). Koormus ei rakendu enne, kui kõik koormamis ja tugirullid on katsekehaga kontaktis. Koormamise kiirus peab jääma vahemikku 0,04 MPa/s kuni 0,06 MPa/s. Paindetõmbetugevus leitakse valemiga:

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

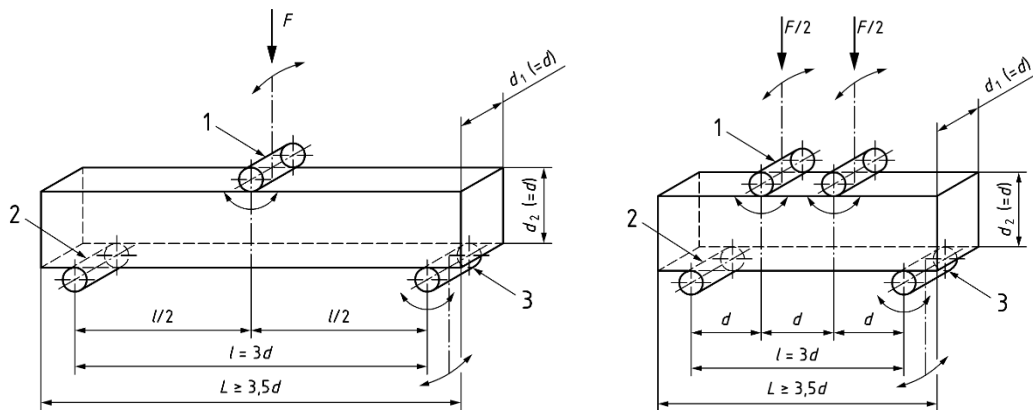
Kus

$f_{ct,fl}$ on paindatõmbetugevus (MPa)

F on maksimaalne koormus N

l on alumiste rullide vaheline kaugus

d_1 ja d_2 on katsekehade mõõdud (vastavalt kõrgus ja laius)



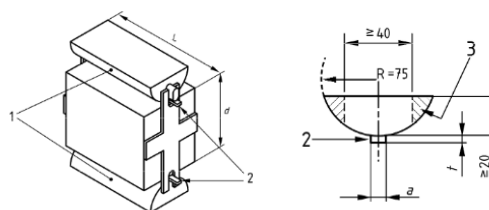
Joonis 1.13 Paindetugevuse määramise katseskeem – 3 punkti paindekatse (vasakul) 4 punkti paindekatse (paremal) [24]

„EVS-EN 12390-6:2009 Kivistunud betooni katsetamine Osa 6 Katsekehade lõhestustõmbetugevus“ [25] paneb paika lõhestumiskatse katsekehade mõõdud, katsetemetoodika ja lõhestusjõu arvutusvalemid. Analoogselt paindekatsega on ka lõhestusel koormamise kiirus 0,04 kuni 0,06 MPa/s. Katsekehadeks on kas kuubid või silindrid ning katseskeemil kohaselt paigutatakse katsekeha tsentriselt survepressi plaatide vahele, kus on tsentrites puitkiudpladist vaheribad. Lõhestusjõud arvutatakse valemiga:

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d}$$

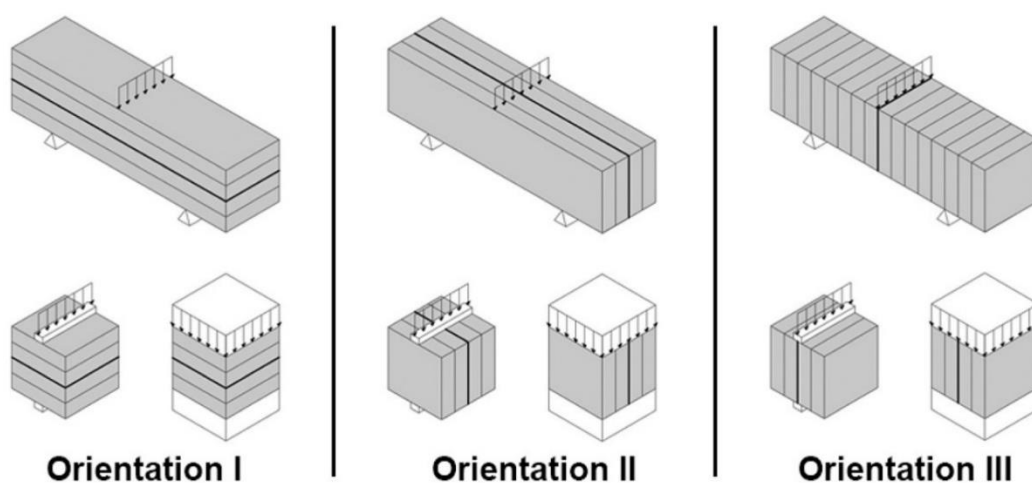
kus

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



Joonis 1.14 Lõhestumisjõu määramise katseskeem 1) terasest koormamisriba 2) puitkiud pladist vaheriba 3) segmendi laius lubatud kärpimisala L) katsekeha pikkus d) katsekeha kõrgus R) koormamisriba raadius a) vaheriba laius t) vaheriba kõrgus [25]

„EVS-EN 12390-3:2019 Kivistunud betooni katsetamine osa 3 Katsekehade survetugevus“ lisa B [18] sätestab metoodika ebastandardsetes mõõdus katsekehade survetugevuse katsetamiseks lisas A: „Kui katsekeha on vaja teha väiksemaks, tuleb seda kas lihvida või saagida, ning valitud koormuspinna silumiseks tuleb seda kas lihvida või katta“. Kuna 3D prinditud katsekehade puhul on kihtide vaheline nake nõrgem, kui normaaltingimustel valmistatud katsekehadel, siis tuleks survetugevuse mõõtmised väljalõigatud kuupidel teha kõigis kolmes sihis (joonis 1.15). Koormuskatse tehakse sama standardi kohaselt, kus katsekehasid surutakse kogu survepinnal ning tsentreeritult survepressi plaatide vahel. Koormamise kiirus peab olema konstantne ning jääma vahemikku $0,6 \pm 0,2$ MPa/s.



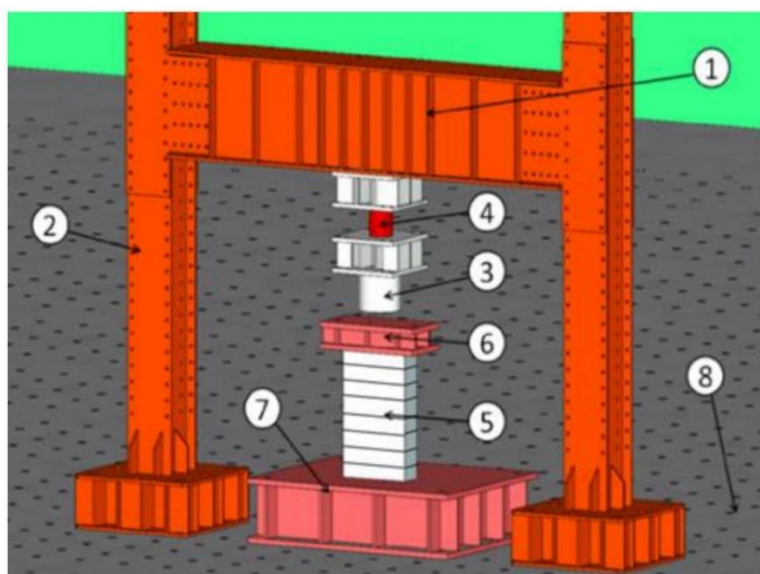
Joonis 1.15 Koormamise suunad kolme punkti paindel, lõhestus- ja survetugevus katsetel [16]

Suuremõõtmeliste koormuskatsete metoodika

Armeerimata 3D prinditud betoonist elemendid enda olemuselt töötavad nagu kivikonstruktsioonid, ehk paindekandevõime on võrreldes survekandevõimega tunduvalt väiksem. Seetõttu keskendume betoonist katsekehadel peamiselt tsentrilisele survele.

Paindekatsete puhul katsekehad ankurdatakse alumisest otsast maa külge ning koormust avaldatakse ülemisele servale. Purunemispõhjus on tavaliselt kihtide vahelises nakkes või betooni tõmbetugevuse ületamises.

Survekatsetel ehitatakse tavaliselt koormamise katsestend lähtuvalt elemendi mõõtudest. Põhimõttelt on katsestendid üsna sarnased – kas ehitatakse stend, mis ankurdatakse maa külge (joonis 1.16) või kasutatakse koormusseinasid. Koormuse määramiseks kasutatakse hüdraulilisi tungraudasid, mis mõõdavad koormust või paigutatakse tungraua vahele tensoandur, mis mõõdab koormust. Lisaks koormusele paigutatakse tavaliselt katsekehade külge, olenevalt mõõtudest, mingi arv mõõtekellasid, mis mõõdavad konkreetses seinas punktis paigutust.



Joonis 1.16 Suuremõtmelise koormuskatse skeem 1) koormuse jaotus tala 2) koormuse jaotus postid 3) tungraud 4) tensoandur jõu mõõtmiseks 5) katsekeha 6) ülemine koormuse jaotusplaat 7) alumine koormuse jaotusplaat [22]

3D prinditud katsekehade ülemine pind on enamasti ebatasane, mis põhjustab koormuse ebaühtlast jaotumist. Paremaks koormuse jaotamiseks kasutatakse kontaktpinna ja surveplaatide vahel neopreeni ja/või vineeri. Alternatiivina on võimalik valada ka elemendi koormatavate pindade peale tasandusvalu juhul, kui koormuspind katab kogu elemendi. Lokaalse koormuse puhul kasutatakse neopreeni.

1.3.2 3D prinditud katsekehade kihtide suuna mõju kandevõimele

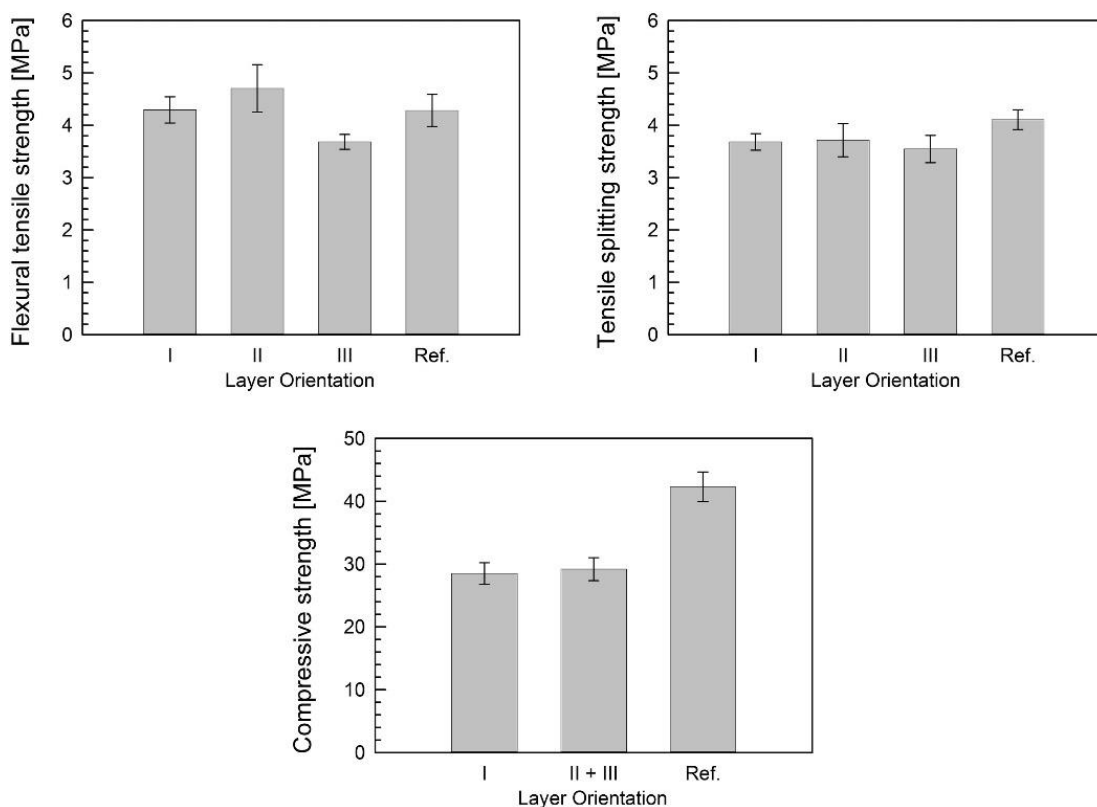
Lähtuvalt joonisest 1.15 nimetame edaspidi kihtide suundasid vastavalt orientatsioonidele:

Suund 1 – koormamise suund printimise kõrguse sihis;

Suund 2 – koormamise suund prinditud katsekehade laiuse sihis;

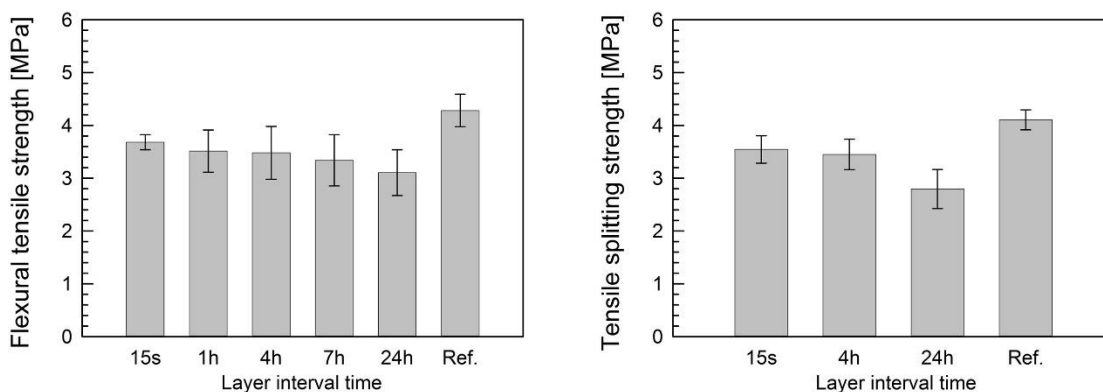
Suund 3 – koormamise suund printimissuuna sihis.

Eindhoveni ülikooli uuringus vaadeldi kihtide suuna mõju kolmepunkti paindele, lõhestumisele ja survele. Võrdluseks tehti ka normaaltingimustel katsekehad samast betoonisegust. Uuringust selgus, et kolmepunkti paindel ja lõhestumisel ei avaldanud kihtide suund mõju. Normaalingimustel katsekehad olid tugevuse poolest samuti samas suurusjärgus nagu 3D prinditud katsekehad. Survetugevuse puhul ei avaldanud kihtide suund samuti mõju, aga võrreldes normaaltingimustel kuubiga oli 3D prinditud katsekehade survetugevus tunduvalt madalam (joonis 1.17). [16] Uuringust järeldub, et survetugevus ei olene koormamise suunast. Kirjeldust segu omaduste kohta vaata lisast 1.1.



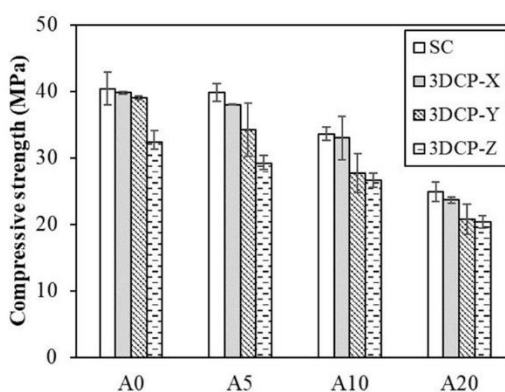
Joonis 1.17 Kihtide orientatsiooni mõju painde-, lõhestus- ja survetugevusele ning võrdlus vormitud kuubiga [16]

Samas uuringus vaadeldi kihtide vahelise printimise aja mõju katsekehade lõhestus- ja paindetugevusele. Katsekehasid printiti kuute tüüpi, kihtide printimise vahel möödunud aja järgi: viisteist sekundit, tund aega, neli tundi, seitse tundi, kaksikümmend neli tundi ning normaaltingimustel tehtud katsekehad. Selgus, et mida pikem on periood kahe kihi printimise vahel, seda väiksem paindetugevus ja lõhestustugevus on betoonil. [16]



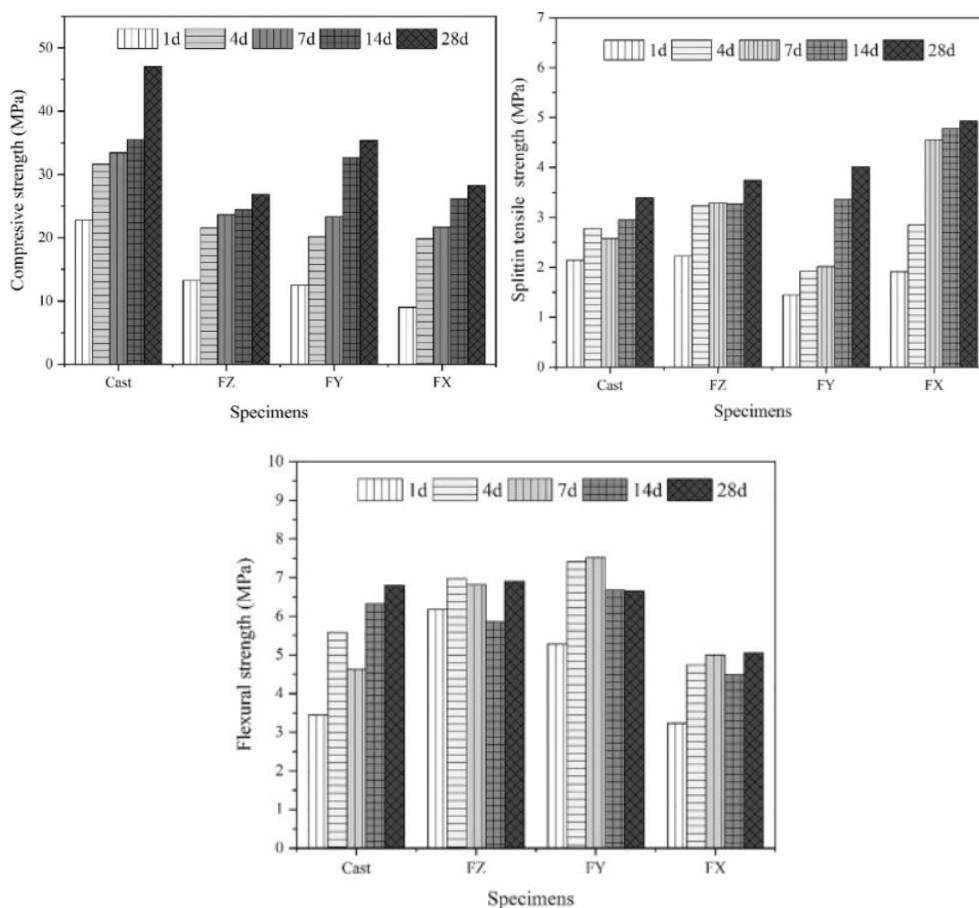
Joonis 1.17 Kihtide printimise vahelise aja mõju paindetugevusele (vasakul) ja lõhestustugevusele (paremal) [16]

Hebei Tehnikaülikoolis tehti nelja erineva betooniseguga katse, kus vaadeldi survetugevusi kõigis kolmes kihtide sihis ning tehti võrdluseks normaaltingimustel kuup. Selgus, et normaaltingimustel katsekeha on võrreldes printitud elementidega tugevam. Olenemata betoonisegudest suund 1 sihilised kuubid olid kõige nõrgemad, suund 2 oli keskmise tugevusega ning suund 3 kõige tugevam. [20] Kirjeldust segu omaduste kohta vaata lisast 1.2.



Joonis 1.18 Kuupide keskmine survetugevus sõltuvalt printitud kihtide suunast [20]

Xi'ani arhitektuuri- ja tehnikaülikoolis tehti analoogne uuring Eindhoveni ülikooliga, kus vaadeldi painde, lõhestus ning survetugevusi kihtide erineva suuna korral. [19] Katsekehad tehti ühe, nelja, seitsme, neljateistkümne ja kahekümne kaheksa päevastena. Survetugevuse poolest normaaltingimustel tehtud katsekehad olid kõige tugevamad. Kuni seitse päeva kivinenud katsekehad näitasid olenemata kihi suunast sarnaseid tulemusi. Kahekümne kaheksa päevastest katsekehadest olid suund 2 sihilised katsekeha tugevamad teistest kihi suundadest. Lõhestumistugevuste poolest olid normaaltingimustel valmistatud katsekehad nõrgemad, kui prinditud katsekehad. Kõige tugevamad olid katsekehad sihis 3. Paindepinge poolest kahekümne kaheksa päevastel katsekehadel erinevusi ei tekkinud referentsi ning suund 1 ja 2 puhul, suund 3 sihilised katsekehad olid teistest nõrgema tugevusega. Paindepinge seisukohast paistab prinditud katsekehadel välja seos, kus pärast nelja päeva paindetugevuses kasvu ei ole. Kirjeldust segu omaduste kohta vaata lisast 1.3.



Joonis 1.19 Kuupide survetugevuse (vasakul), lõhestumistugevuse (paremal) ja paindetugevuse (all) sõltuvus koormuse sihist [19]

Survetugevuse poolest varasemates uuringutes tuleb välja, et normaaltingimustel tehtud kuubid on prinditud betoonkuupidest kõigis vaadeldud uuringutes tugevamad. Prinditud betoonist katsekehade puhul oli märgata erinevusi – Eindhoveni ülikooli uuringus tuli välja, et kihtide suund ei mõjuta survetugevust, samas Xi’ani arhitektuuri- ja tehnikaülikooli ning Hebei tehnikaülikooli uuringutest selgus, et survele on kõige tugevam suund 2, samas suund 1 ja suund 3 oli mõlemas uuringus ligilähedaste tulemustega. Lõhestus- ja paindetõmetugevuse katsed Eindhovenis näitasid taaskord suure erinevuse puudumist, samal ajal kui Xi’ani uuringus oli suund 1 lõhestumisele tugevam teistest suundadest ning paindetugevus suunas 1 nõrgem teistest suundadest. Kuna kõikides uuringutes tulevad välja erinevad tulemused, siis võime järeldada, et printimistehnoloogial ning printimissegudel on äärmiselt suur mõju katsekehade tugevusele. Sellest tulenevalt ei tehta selles uuringus eeldusi varasemate uuringute pealt, vaid määratakse betooni parameetrid lisaks katsekehade kandevõimele.

1.3.3 Varasemad suuremõõtmelised koormuskatsed

2020 aastal tehti uurimus 3D prinditud seinte purunemist tsentrilisel survele. [22] Selle jaoks prinditi kaheksa katsekeha, millest kuus tükki armeeriti. Kõik prinditud seinad tehti 240 mm paksud ning 720 mm pikad. Kõrguse siht katsekehadel muutus vahemikus 720-2400 mm. Katsekehad armeeriti horisontaalsihis $\varnothing 8$ armatuurvarrastega kihtide vahelisel alal sammuga 400-750 mm olenevalt katsekeha kõrgusest.

Koormuskatsete jaoks valmistati elemendid ette, tasandades ära pealmise kihi, et koormusjaotus oleks ühtlane. Seinasid koormati kogu seina ristlõike ulatuses ühtlaselt. Koormamise ajal paigutati elemendi külgedele mõõtekellad külgsuunalise siirde mõõtmiseks. Katses kasutatud survepressi skeem on esitatud joonisel 1.16. Koormust rakendati kolmes etapis 300 kN kaupa, kuni elemendis tekkisid põikipraad, seejärel vähendati koormamise sammu 50 kN-ni. [22]

Katsetest selgus, et betoonist 3D prinditud suuremõõtmeliste katsekehadele on iseloomulik habras purunemine. Elementide purunemisel tekkisid esmalt horisontaalsed praad, millele järgnes vertikaalsete põikipragude teke ja järsk purunemine. Uuringutest selgus, et horisontaalne armatuur vähendas tsentrilisel survele lõplikku kandevõimet – purunemine toimus armeeritud tasapinnast – kihtide vaheline nake oli nõrgem tulenevalt kontaktpinna ala vähenemisest. [22]

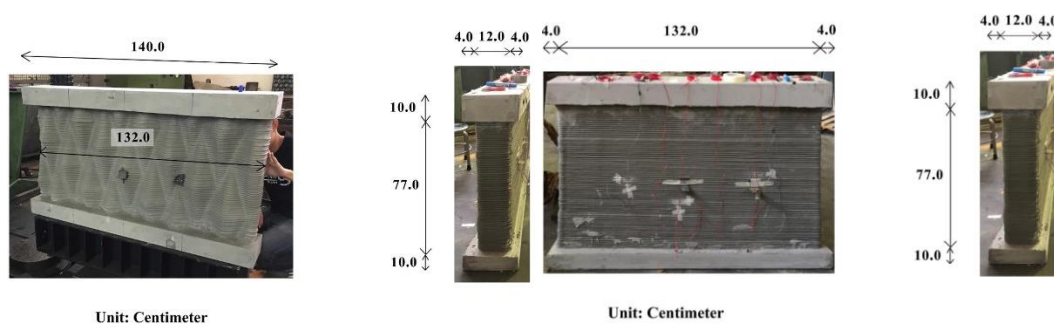


Joonis 1.20 Tsentriliselt koormatud seinte purunemispildid [22]

Märtsis 2021 Chulalongkorn ülikoolis tehti uuring armeerimata 3D prinditud seinte kohta. Uuringus vaadeldi kahte erineva ristlõikega seina – tasase pinna ja seest tugevdatud struktuuriga ning „teemant“ struktuuriga ristlõikeid (joonis 1.21). Seina ristlõike mõõtudeks olid „teemant“ struktuuriga seinal 132x12x77 cm. Katsekehasid ei armeeritud.

Koormuse jaotuseks valati katsekeha üla ja alapinda betoonvööd koormuse ühtlaseks jaotuseks. Seinte koormamiskiiruseks valiti 40 kN/min. Koormamisel paigutati nii vertikaal-, kui horisontaalsirde mõõtmiseks elemendi külge mõõtekellad.

Uurimusest selgus, et kuigi keeruka kujuga seinaelemenide nagu „teemant“ ristlõikega seina printimine on võimalik, siis mustris süvenditesse tekkisid suured tõmbepinged, mille tulemuseks oli pragunemine, lõhestumine ning tunduvalt madalam kandevõime. Tasapinnalise seina puhul tuli välja, et sisemine sõrestik vähendab tunduvalt seina paigutusi.



Joonis 1.21 3D prinditud seinad „teemant“ ristlõikega (vasakul) ning tasapinnalisena (paremal) [21]

1.3.4 Suuremõõtmeliste katsekehade teoreetiline kandevõime

3D prinditud katsekehade teoreetilised kandevõimed leiti EVS-EN 1992-1-1:2007 punkt 12.6.5.2 alusel. [23] Kuna meie katsekehade puhul on tegemist seest õõnsate ristlõigetega ning koormus jaotatakse elemendi tsentris lokaalselt, siis võetakse ristlõike kõrgusest lihtsustusena õõnsate alade mõõdud maha. Ristlõike pindalaks võetakse lihtsustusena kontaktpinna mõõdud. Kuigi ülemine kiht on ovaalne ja koormusjaotus ei ole ülemise seinalõigu peal lineaarne, siis vaadeldakse koormust sellest olenemata lineaarsena. Katsekehade survekandevõime määratakse valemiga:

$$N_{Rd} = b * h_w * f_{cd,pl} + \Phi$$

kus

- N_{Rd} on ristlõike survekandevõime
- b on ristlõike kogulaius
- h_w on ristlõike kogukõrgus (seina paksus)
- Φ on ekstsentrilisuse (kaasa arvatud teist järku ekstsentrilisus) ja roome mõju arvestav tegur

Seotud elemendi teguri Φ võib avaldada kujul:

$$\Phi = 1,14 * \left(1 - \frac{e_{tot}}{h_w}\right) - 0,02 * \frac{l_0}{h_w} \leq 1 - \frac{e_{tot}}{h_w}$$

kus

$$e_{tot} = e_0 + e_i$$

- e_0 on esimest järku ekstsentrilisus, mis vajaduse korral võtab arvesse vahelae mõju ja horisontaalkoormusi
- e_i on geomeetriliste konstruktsioonihälvete mõju arvestav täiendav ekstsentrilisus

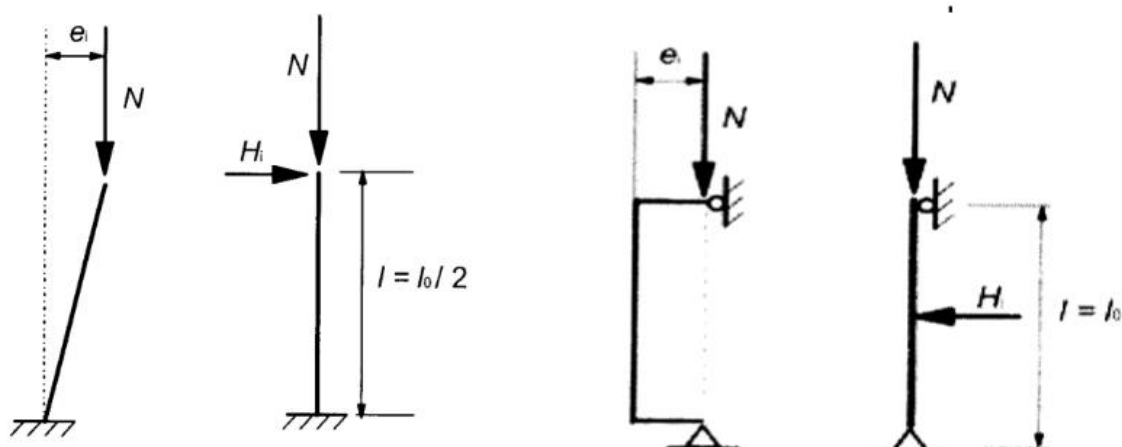
Kuna konkreetsetes töös katsetatakse elemente tsentrilisele koormusele ning täiendavaid horisontaalseid koormuseid ei teki, siis võtame arvesse ainult konstruktsioonihälvete mõju ning leiame ekstsentrilisuse sama eurokoodi jaotise 5.2 lõige 9 alusel, mis ütleb:

“Seinte ja seotud süsteemis eraldiseisvate postide korral võib tavaliste ehitushälvetega seotud konstruktsioonihälbeid lihtsustatult arvesse võtta ekstsentrilisusena.” [23]

$$e_i = \frac{l_0}{400}$$

kus

l_0 on elemendi efektiivne kõrgus



Joonis 1.22 Mitteseotud süsteem (vasakul) ja seotud süsteem (paremal) [23]

2. KATSELINE OSA

Magistritöö eesmärgiks on hinnata suuremõõtmeliste 3D printitud postide ja seinaelementide kandevõimet ning purunemispilte ning võrrelda seda betooni parameetritega ning lihtsustatud eurokoodi arvutustega. Koormamisel tehti eeldus, et purunemispilt on habras ning katsekehad purunevad lokaalse muljumise tõttu servades.

Katsekehad valmistati märtsi lõpus ja aprilli alguses 2022. aastal. Katseseeria koosnes 7 postist ja 3 seinaelemendist. Pärast printimist hoiti katsekehasid $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ruumis, õhuniiskus oli ca 35...45 %, katsekehasid täiendavalt ei kaetud ega niisutatud. Katsekehad purustati 14 päeva vanuses. Kõik katsekehad valati kolmel päeval osade kaupa.

2.1 Katseplaan

Katseplaan:

1. Ettevalmistustööd betooni printimiseks:
 - a. CADi mudelite ettevalmistus
 - b. Testprintimine lähtuvalt mudelitest, et paika panna optimaalne kihtide laius ja arv järjestikusel printimisel
 - c. Testprintimine, et kontrollida robotkäe tööulatuse sobivust
2. Katsekehade printimine etappide kaupa
3. Katsekehade geomeetriliste hälvete mõõtmised
4. Survestendi paika sättimine tulenevalt katsekehade mõõtudest
5. Postide ja seinte tsentrilise surve katsed lokaalse koormuse all
6. Katsekehadest lõigatud kuupide survetugevuse ja paindetõmbetugevuse määramine

2.2 Katsemetoodika

2.2.1 Kasutatud materjalid

Kasutatud betooni koostis:

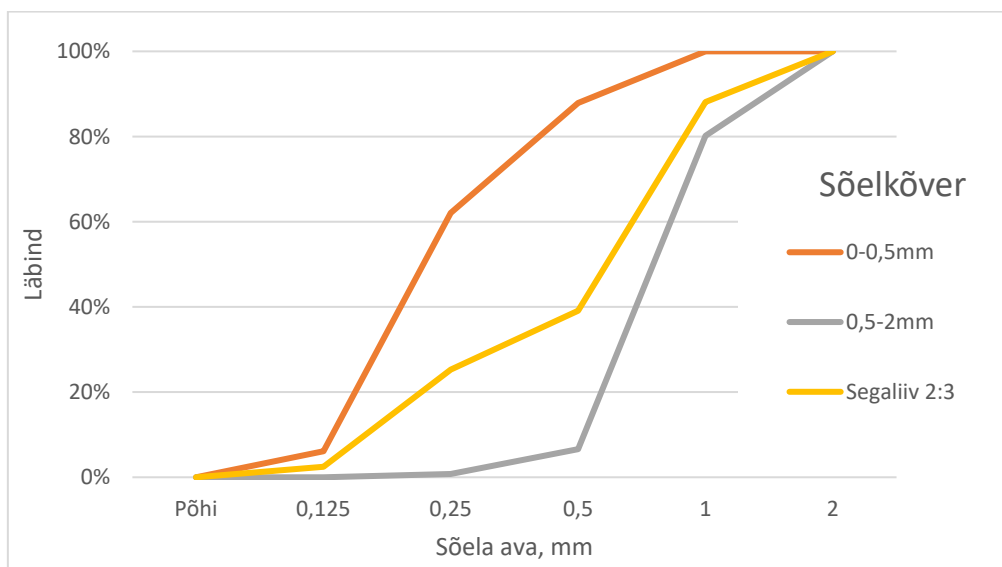
Printimiseks valmistati betooni kuivsegu kokku 1200 kg. Kuivsegu valmistamisel kasutati peenliiva fraktsiooniga 0-0,5 mm, jämeliiva fraktsiooniga 0-2 mm, KNC portlandtsementi CEM I 52,5R, polüetüleenist kiudu pikkusega 5 mm, pulbrilist

tardumise kiirendit, pulbrilist superplastifikaatorit ning veehoidvust suurendavat lisandit. Kuivsegu segati kokku 50 kg segumites – esmalt kaaluti välja vajalikud kogused (Tabel 2.1) ning seejärel segati igat masinatäit 10 minutit.

Tabel 2.1 Betoonisegu koostis

Kuivsegu koostis				
Koostis-komponendid	Segu koostis		1	m ³ kohta
	%	mass		Liitrit
Tsement	25	475	kg	905
0-0,5mm	45	855		
0,5-2mm	30	570		
Fiber	0,05	950	g	
Kiirendi	1	4750		
Sup.plast	0,02	380		
Veehoidv	0,05	950		
Summa		1900.00		

Liivade jaoks määrati sõelkõverad ühekordsel katsel 500 g kaupa. Liivad sõeluti kuue minuti vältel kasutades järgmisi sõelasid: 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm ja 0,125 mm. Segu liiva kogus on määratud arvutuslikult.



Joonis 2.1 Liivade sõelkõverad – jämeliiv, peenliiv ja nende segu vahekorraga 2:3

2.2.2 Kasutatud seadmed

Kuivsegu valmistamine:

Laborikaalud, kühvlid, ämbrid, betoonisegisti

Betoonisegu printimiseks ettevalmistamisel ja betooni printimisel:

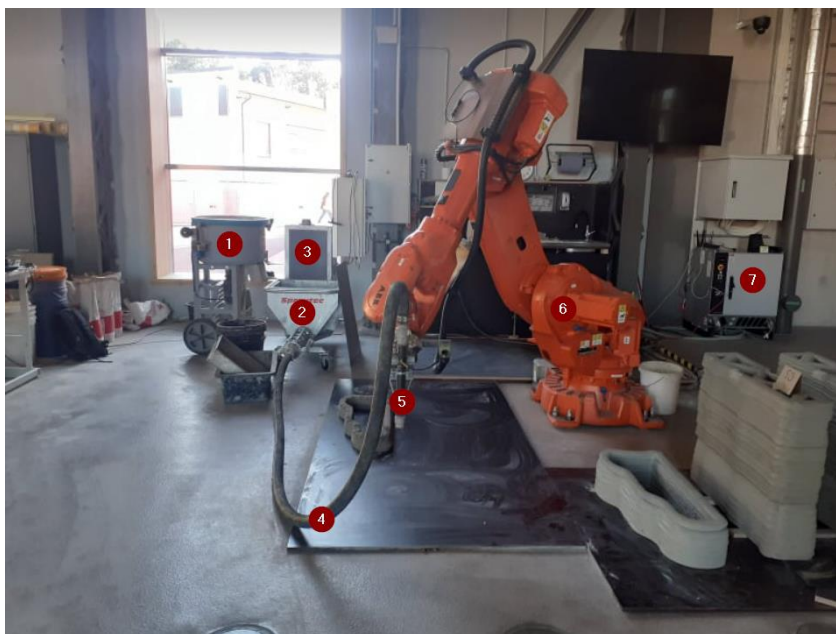
Laborikaal, ämbrid, betoonisegisti, betoonipump, robotkäsi, vibronui, sülearvuti (programm robotkäele ja printimispea teekonnad mudelis), veepihusti, sildkraana

Katsekehade purustamisel:

Hüdraulilised silindrid, katseraam, mõõdulint, metallist joonlaud, sildkraana, suhtelise paigutise mõõtekellad, mõõtesild koos arvutiga, nihik, survepress, laborikaal.

2.2.3 Betooniprinteri kirjeldus ja parameetrid

Katsekehade printimiseks kasutati kuuateljelise 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.



Joonis 2.2 Robotkäe juhtimissüsteemiga 3D printer 1) betooni segisti 2) betooni pump 3) betooni pumba kontroller 4/5) voolik siseläbimõõduga 50 mm ja printimispea siseläbimõõduga 35 mm 6) kuue teljeline robotkäsi 7) robotkäe kontroller

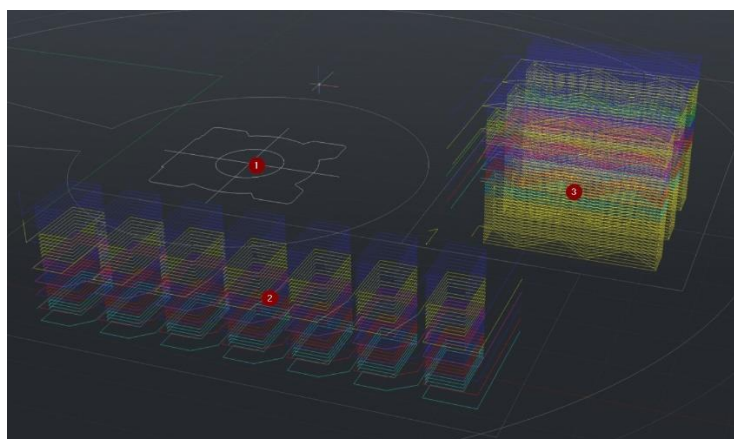
Katsekehade printimiseks kasutatud betooni 3D printeri parameetrid:

- Robotkäe suurim tööraadius 2,35 m
- Pumba kiirus 3 L/min
- Segisti maht 80 L
- Vooliku pikkus ja läbimõõt $L = 5 \text{ m}$ $d = 40 \text{ mm}$
- Printimispea siseläbimõõt $d = 35 \text{ mm}$
- Kihi kõrgus $h = 15 \text{ mm}$
- Printimiskiirus 6,8 cm/s

2.2.4 Katseseeria printimise kirjeldus

Töö käigus prinditi koormuskatsete jaoks 7 posti ja 3 seinaelementi, et määrata nende purustav koormus lokaalsel koormamisel. Lisaks sellele määrati kasutatud printimistehnoloogia ja segude juures geomeetria ebatäpsused ning kuidas katkestused printimisel mõjutavad betooni omadusi.

Enne igat printimist valmistati ette kuivsegud lähtuvalt tabel 2.1 retseptist. Lisaks sellele valmistati ette CADi mudelis seinte ja postide teljed (joonis 2.2) ning iga etapi alguses kontrolliti üle 3D printeri tööulatus, sest robotkäe liigendite piiridest pole kõikidesse asukohtadesse liikumine saavutatav. Esimese printimispäeva alguses valmistati ette tööala. Nii printimise alguses kui printimise ajal jälgiti, et printimispea küljes olevad detailed ei liiguks läbi kõrval olevate elementide.



Joonis 2.2 CADi kolmemõõtmelises mudelis koostatud printimispea teekond katsekehade printimiseks 1)betooniprinteri põhjaplaan koos maksimaalse tööraadiusega 2) postide teljed etappide kaupa 3) seinte teljed etappide kaupa

Printimine toimus kolmel päeval, igaks päevaks valmistati ette 400 kg kuivsegu. Tehtud betoonisegu vesi-tsement tegur jäi vahemikku 0,54-0,58. Betoonisegu töödeldavust hinnati visuaalselt ilma täiendavaid mõõtmisi tegemata. Segu segati betoonisegistis 50-100 kg kaupa selliselt, et oleks võimalik betooniprinteri pidev töö. Printimise ajal kasutati betoonipumba mahutis vibronuia ning vajadusel labidat, et pumba kruvi sissevõttust segule õhku vahele ei võetaks. Betoonisegu ei jäetud pumba seisma kauemaks kui 90 minutit. Enne printimiste algust niisutati pump ja voolik esmalt veega ning seejärel printimisseguga, kuni segu voog muutus ühtlaseks.

Seinte printimisel prinditi katsekehad kolmes etapis, esimese ja teise etapi vahel oli 48 tundi ning teise ja kolmanda etapi vahel oli 24 tundi. Esimeses etapis prinditi 16 kihti neljakihiliste plokkidena. Iga neljakihilise ploki vahel tehti kümneminutine paus ning seejärel prinditi järgmised kihid. Sama protsessi korrati kõigis etappides. Pärast seinte viimase kihi printimist jäeti katsekehad kaheks nädalaks kivinema katmata ja niisutamata tingimuste juures (joonis 2.3).

Postide printimisel prinditi katsekehad kolmes etapis 24 tunniste vahedega. Esimesel päeval prinditi 16 kihti neljakihiliste plokkidena. Iga neljakihilise ploki vahel tehti kümme minutit pausi ning seejärel prinditi järgmised kihid. Teises etapis prinditi 16 kihti kaheksakihiliste plokkidena. Plokkide printimise vahele jäeti taaskord 10 minutit. Kolmandal etapil prinditi juurde 32 kihti kaheksa kihiste plokkidena. Plokkide vahele jäeti ka viimases etapis 10 minutised pausid. Pärast postide viimase kihi printimist jäeti katsekehad kaheks nädalaks kivinema hooldamata tingimuste juures (joonis 2.3).



Joonis 2.2 3D prinditud katsekehad – postid (vasakul) ja seinaelemendid (paremal) etappide kaupa

2.2.5 Katsekehade kivistumistingimused

Kõik katsekehad testiti hooldamata tingimustel. Katsekehadel lasti kivineda betooniprinteri tööala piirkonnas. Sellel alal mõõdeti ka temperatuuri ning õhuniiskust – selle jaoks paigutati piirkonda logimisseade, mis salvestas lugemi õhutemperatuuri ja õhuniiskuse kohta iga 15 minuti järel. Keskmine õhuniiskus kivistumisperiodil oli 30,5%, kusjuures maksimaalne õhuniiskus oli 48% ning minimaalne 15,7%. Katsehallas oli kivistumisperiodil keskmine temperatuur 20,7°C, maksimaalne temperatuur oli 29,4°C ning minimaalne 14,3°C.

2.2.6 Katseseeria printimistehnoloogiast tingitud puudused

Katseseeria printimisel tekkisid seoses segude ja printimistehnoloogiaga puudused, mis mõjutasid katsekehade geometriat ning avaldasid mõju nii kandevõimele kui katsekehade välimusele. Tulenevalt printimisegu omadustest (peamiselt kiirendi) hakkab betoonisegu kiiresti kividema. Lisaks sellele kasutati pumba mahutis vibronuaia, mis töötamisel eraldab märgatava koguse soojust ning soodustas betooni kividemisprotsesside kiirendatud käivitumist. Sellest tingituna segu pumbatavus printimise tsükli alguses ja lõpus erines oluliselt ning prinditud kihi laius erines üle kahe korra – kõige kitsam mõõdetud kihi laius oli 20 mm ning kõige laiem 65 mm (joonis 2.3).



Joonis 2.3 Printimisegu vanuse mõju prinditud kihi laiusele

Printimisel kasutati ühe pumbaga süsteemi, kus pump on printeri alguses, seetõttu jõuab pumba kiiruse muutmise mõju printimispeani viivitusega, mis omakorda tähendab, et printimist pole võimalik alustada ega lõpetada momentaalselt. Seetõttu alustatakse printimist alati eemalt, nii et printimise alguseks oleks betoonisegu voog ühtlane ning liigutakse elemendi printimisalale alles siis, kui pump juba püsivalt töötab.

Lõpetamisel samamoodi ei saa lõpetada elemendi lõpppunktis, vaid tuleb liikuda elemendi tööalalt eemale ning siis pump seisata. Analoogseid vigu võib tekkida, kui robotkäe programm lõpetab töötamise mingi vea tõttu – see tähendaks, et robotkäsi jääb statsionaarselt enda asendisse, kuid isegi pumba momentaalse peatamise korral segu voog ei lõpeks. Selliste vigade vältimiseks oleks võimalik kasutada kahe pumbaga süsteemi, kus üks pump transpordib segu printeri peasse ning teine pump on vahetult printimispeas, mis võimaldab printimist alustada ja lõpetada täpsemalt. Teine võimalik lahendus oleks printeri peasse klapi lisamine – see võimaldaks segu voogu kiiremini lõpetada, aga ei lahendaks probleemi printimise alustamisega seoses.



Joonis 2.4 Printimise tehnoloogiast tekkinud ebatäpsused ja vead katsekehade geometrias

2.2.7 Katseseeria koormuskatsete meetodika

Kõik katsekehad katsetati koondatud tsentrilisele koormusele. Katsetamise jaoks püstitati katsestend (joonis 2.5), millega mõõdeti purustavat koormust ning horisontaalsuunalist siiret. Survejõudu mõõdeti kahele silindrile rakendatud õlirõhu kaudu ning horisontaalsiirete jaoks paigutati katsekeha tsesse pikemale küljele elektroonilised mõõtekellad.

Postid ja seinaelemendid asetati katsestendi vahele tsentraalselt, fikseerides need algkoormuse kuni 5 kN juures tulenevalt sellest, et katsestendi keermelatid andsid katsestendile mõningase liikumisvabaduse soovimatus suunas. Kui katsekehad olid stendi vahele fikseeritud, paigutati katsekehaga vahetusse kontakti mõõtekellad selliselt, et oleks võimalik mõõta mõlemas suunas esineda võivaid siirdeid. Kui katsekehad olid valmis koormamiseks, nulliti mõõtekellade ja silindrite õlirõhu lugemid ning alustati koormamist.

Katsekehasid koormati kuni 120 kN koormuseni kiirusega 10 MPa/min, alates 120 kN kuni katsekehade purustava koormuseni vähendati koormamiskiirust kuni 2 MPa/min. Esimesel katsekehal koormati kogu koormuspindala kuni 450 kN koormuseni. Selle koormuse juures katsekehal plastseid deformatsioone ei täheldatud ning kuna katseseadmete maksimaalne arendatav koormus oli 500 kN, siis koormamine lõpetati. Edasi vähendati koormuspindala 150 mm laiusele ribale peale elemendi tsentris, nii et see toetus vaid ribaga risti olevatele seinaosadele. Sellist koormusskeemi kasutati ka kõigi järgnevate katsete puhul.

Katsestend (joonis 2.5) oli jõupõrandasse kinnitatud kahe keermelatiga – maksimaalne lubatud koormus 500 kN (250 kN jõupõranda kinnitusava kohta). Katsekeha alla valmistati terasaladest ühtlane pind, mille peale asetati terasplaadid läbimõõduga 40 mm ning selle peale veekindel vineer, et katsekehade alumine pind oleks katse käigus ühtlaselt jaotatud koormusega. Katsekeha keskpunkt määrati kasutades metallist joonlauda ning tsentreerides jaotusplaadiks kasutatud vineeri katsekeha suhtes. Katsekehade peale pandi elementide ülapinna ebatasasuse tõttu neopreeni ja vineeri kihid. Kuigi neopreeni tugevus mingites punktides ületati, võib siiski eeldada, et see aitab koormust ristlõike ulatuses võrdsemalt jaotada. Selle peal oli omakorda 40 mm läbimõõduga terasplaat ja kaks identset silindrit, mille abil anti koormus katsekehadele. Ülemine ja alumine jaotustala olid omavahel ühendatud keermelattidega, see võimaldas ülemisel jaotustalal tulenevalt poldiava lõtkudest töötada piiratud vabadusega liigendina. Kuna ülemine tala sai pöörduda, siis muljumise puhul esines olukorda, kus tala pöördus kaasa sinna suunas kuhu koormusplaat muljus jälje.



1. Ülemine jaotustala
2. Hüdraulilised silindrid maksimaalse summaarse jõuga 500 kN
3. Terasest jaotusplaat läbimõõd 40 mm
4. Veekindel 10 mm vineer koormuspinna piiramiseks ja ühtlaseks jaotuseks
5. Neopreen koormuse paremaks jaotuseks
6. Katsekeha
7. Mõõtekellad külgsuunalise siirde mõõtmiseks
8. Veekindel vineer, mille all on terasest jaotusplaadid ühtlaseks koormuse jaotuseks aluspinnale
9. Alumine jaotustala

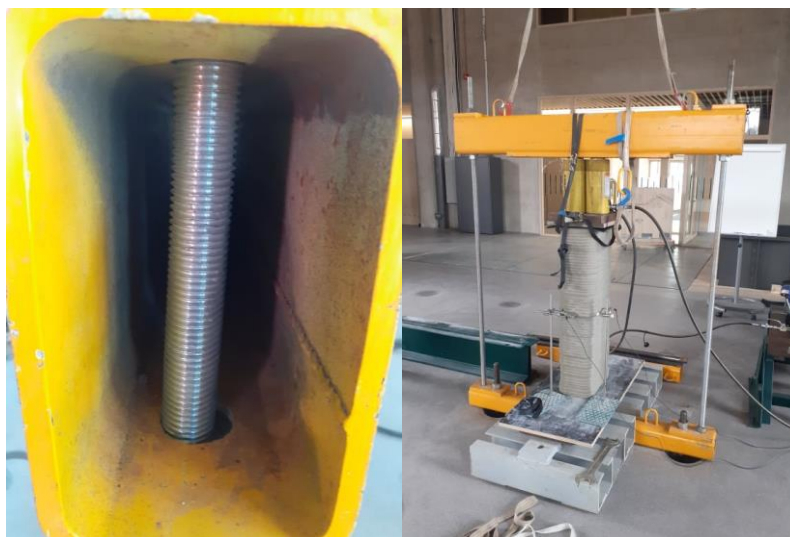
Joonis 2.5 Katseskeem posti ja seinte koormuskatsetel

2.2.8 Koormuskatsete meetodikast tingitud ebatäpsused

Tulenevalt katsestendi ehitusest, mõõtmiste ebatäpsustest ning katseseadmete paigutusest olid katsetustel mõningased ebatäpsused. Esimesel katsel paigutati mõõtekellade statiivid katsekehaga sama alusplaadi peale. Koormamisel vineeri deformatsioonidest tingitult hakkas ka mõõtekella statiiv pöörduma ülevalt katsekehade poole, millest tingituna mõõtekell näitas katsekeha deformatsioonide asemel plaadi ja katsekeha deformatsioonide koosmõju. Järgnevatel katsetel puudus kõrvaldati ning mõõtekellade statiivide jaoks ehitati eraldi alused.

Mõõtekellad asetati vahetusse kontakti katsekehaga. Kuna katsekeha pind on lainetav ning mõõtekelladega mõõdeti horisontaalsuunalist siiret, siis vertikaalsiirete mõju tõttu mõõtekella asetus muutus ning mõõtekella nõel kukkus kihtide vahelistesse soontesse või jäi katsekeha suhtes mingi nurga alla.

Ülemise ja alumise jaotustala ühenduseks oli keermelatt. See tähendas, et katsestendi oli võimalik nihutada ühele ja teisele poole poldiavade lõtkude ning keermelati läbipainete võrra. See tähendab, et katsekehale tsentraalse koormuse jaoks tuli täpselt fikseerida nii katsekeha kui katsestendi asend ning samaaegselt jälgida, et alusplaadid ei nihkuks, neopreen, vineer ja koormamisplaadid oleks tsentraalselt, ehk liikuvaid elemente oli vaja kõiki samaaegselt paika sättida, mis on aldis paigutusvigade tekkimiseks. Suurte koormuste juures muljus katsekeha end vineerplaadi sisse ning ka vineerplaat katsekeha sisse. See võimaldas ülemisel jaotustalal hakata liigendina tööle muutes enda suunda selliselt, et tala pöördus rohkem muljunud ala suunas, millega vähenes kokkupuutepind ja suurenes pinge (joonis 2.6).



Joonis 2.6 Katseskeemist tingitud ekstsentrilisus - jaotustala pöördumine (vasakul), mõõtekellad deformeeruva alusplaadi peal (paremal)

2.3 Betooni parameetrite määramine

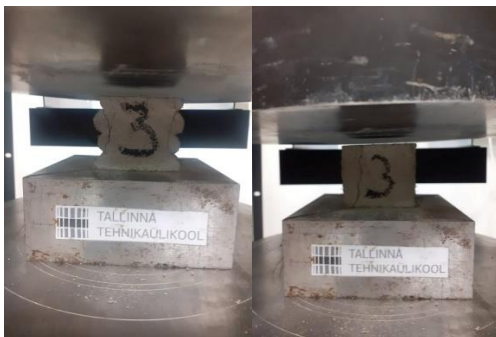
Betooni parameetrite määramiseks viidi läbi kolmepunkti paindekatsed ning survetugevuse määramine lähtuvalt prinditud kihtide suunast nii veega küllastunud kuupidel kui õhkuivadel kuupidel kolmes suunas, et määrata kas prinditud betooni puhul kihtide suund mõjutab betooni survetugevust. Lisaks sellele viidi läbi ribiliste katsekehade survetugevuse katsed.

2.3.1 Betooni survetugevus olenevalt kihtide suunast

Betooni survetugevuse määramiseks tehti 3 katse seeriat ning katsekehad purustati 30 päevastena. Esimeses katseseerias lõigati katsekehad selliselt, et külje peal olevad ribad jäeti alles. Ribilise pinna keskmine laius arvutati kõige madalama ristlõike mõõdu ja kõige suurema ristlõike mõõdu aritmeetilise keskmisena. Katseseerias tehti 6 kuupi (2 sihti - kummagi sihi kohta 3 kuupi). Katsekeha pikkus teistes suundades oli 50 mm. Kõik lõigatud pinnad lihviti enne survekatset siledaks, seejärel mõõdeti üle ning kaaluti. Kõik lõikamised tehti teemantkettaga kivisaega kuivalt.

Teise katseseeria jaoks lõigati välja 50x50x50 mm katsekehad. Katseseeria koosnes 9 kuubist (3 põhisihti - iga sihi kohta 3 kuupi) ning katsekehad purustati 30 päevastena. Katsekehade kõik pinnad olid lõigatud pinnad, katsekeha survepinnad lihviti siledaks. Seejärel määrati katsekehade kõigi külgede pikkused ning leiti aritmeetiline keskmine. Koormamiskiiruseks valiti 0,6 MPa/s.

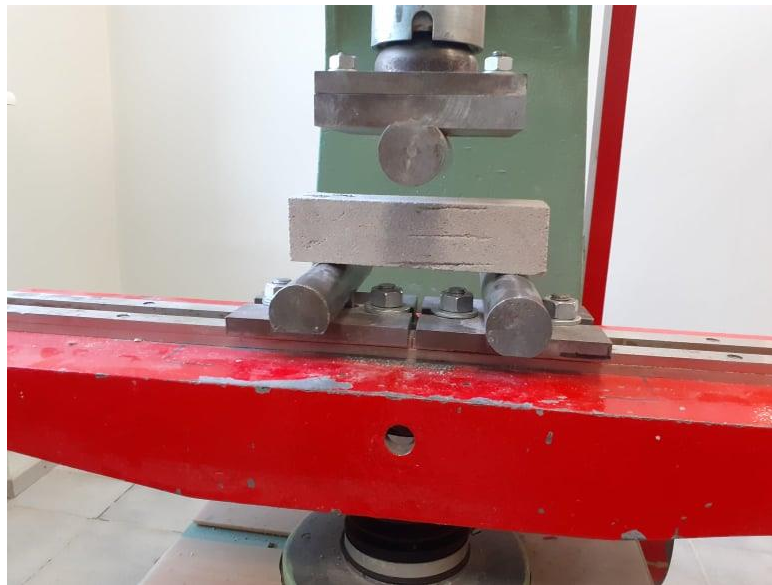
Kolmas katseseeria on täpne analoog teisele katseseeriale. Ainus erinevus oli see, et kuubid jäeti enne koormamist 24 tunniks vette. Koormamispäeval tõsteti kuubid veest välja restile 10 minutiks kuivama. Seejärel katsekehad kaaluti ning purustati.



Joonis 2.7 Survekatse ribilised katsekehad (vasakul) ja igast küljest lõigatud katsekehad (paremal)

2.3.2 Betooni paindetõmbetugevuse määramine

Betooni paindetõmbetugevuse määramiseks lõigati prinditud katsekehadest välja prismad mõõtudega 35x35x140 mm. Katsekeha kõik pinnad lihviti siledaks ning koormati printimise kõrguse suunas. Katseseerias mõõdeti kolme elemendi paindetõmbetugevust, tugedevahelise kauguse 105 mm juures, painerakise tugedest kaks olid liigendtoed (joonis 2.8). Paindetõmbetugevus määrati kolme punkti katsel – koormamise kiirus oli 80 N/s. Katsekehade mõõdud võeti pikkuse sihis üks mõõt ning läbimõõtu vaadeldi kolmes ristlõikes – katsekeha mõlema otsa lähedal ning keskmises ristlõikes. Paindetõmbetugevuse arvutusel võeti aluseks katsekeha ristlõike pindala katsekeha keskel.

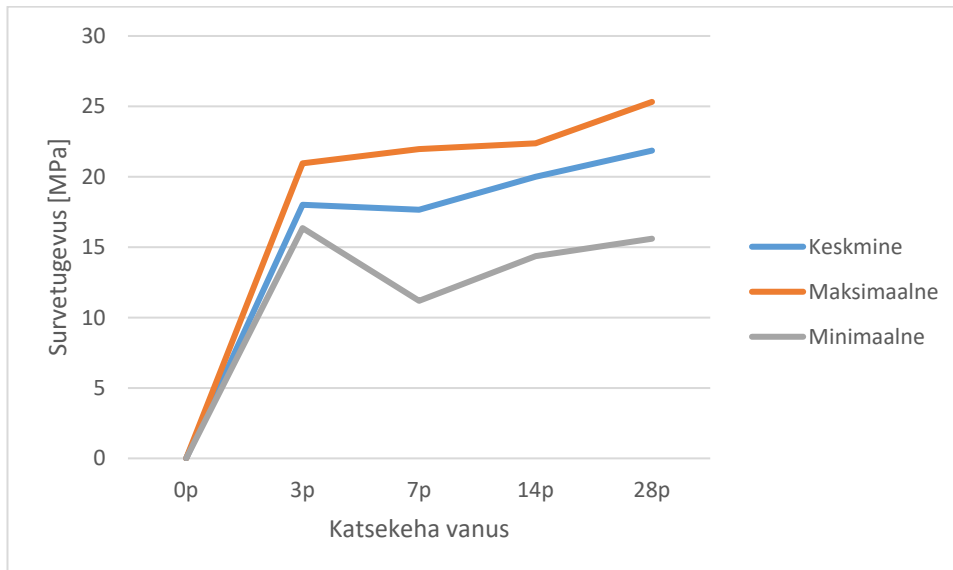


Joonis 2.8 Paindekatse purustamine kolmepunkti paindekatsel

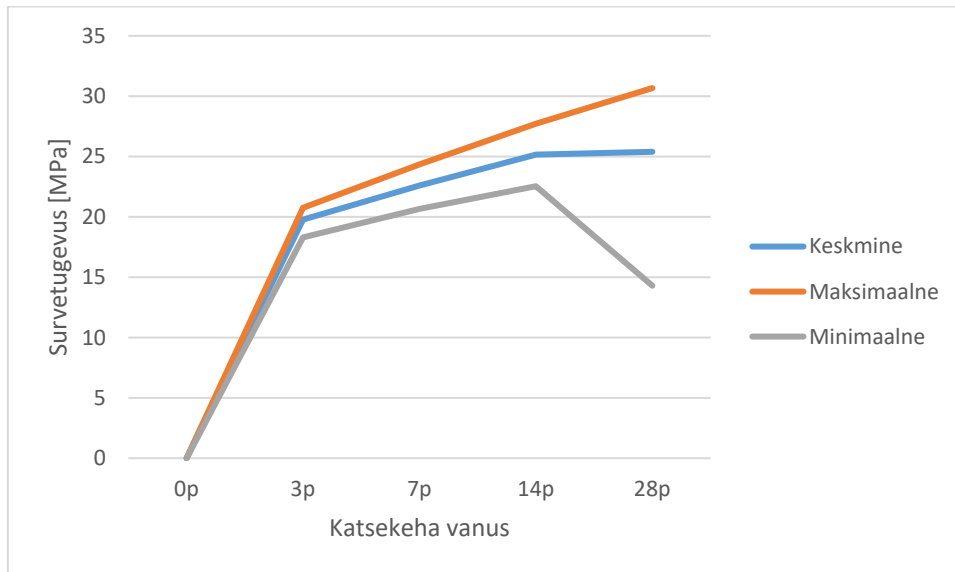
3. KATSETULEMUSTE ANALÜÜS

Eeldatavalt jaanuaris 2023 ilmuvas Karl Tammkõrva magistr töö katseplaanis on täpselt sama retsepti järgi tehtud seguga valmistatud 50x50x50 mm katsekehad, mis lõigati välja 3D printitud betoonist seinaelementidest. Joonis 3.1 ja joonis 3.2 kirjeldavad saadud tulemusi keskmise, maksimaalse ja minimaalse survetugevuse kohta olenevalt kuupide vanusest ja hooldusest. Katsetamise käigus valati kuupide peale koormatavatele pindadele õhuke betoonivalu koormusjaotuse jaoks survepressi vahel. Survekatsete käigus ei eristatud printitud katsekehade kihtide suunda.

Kuna siinne uuring keskendub hooldamata betoonile, siis vaatleme edaspidi ainult hooldamata kuupide katsetulemusi. Uuringus tehti kolme, seitsme ja neljateist päevaseid katseid kuue katsekehaga ning kahekümne kaheksa päevaseid katseid kolmekümne viie katsekehaga. Hooldamata katsekehade puhul järeldus, et survetugevus ajas kasvas olenemata sellest, et katsekehadel oli võimalik kohe välja kuivada – siiski oli survetugevuse kasv võrreldes hooldatud kuupidega tunduvalt aeglasem ning statistikat mõjutasid katseseeriates väga suured tugevuste kõikumised. See võis olla tingitud nii betoonisegu omadustest, koormamise suunast kui ka katsevigadest. Tulemuste põhjal valiti arvutustes betooniklassiks C16/20.



Joonis 3.1 Hooldamata kuupide survetugevused 3, 7, 14 ja 28 päeva vanustena



Joonis 3.2 Vees kivistunud kuupide survetugevused 3, 7, 14 ja 28 päeva vanustena

Võrdluseks eelnimetatud magistritööle ning varasematele uuringutele tehti selles magistritöös katsed 50x50x50 mm kuupidega, mis lõigati pärast postide koormuskatseid välja osaliselt purustatud elementidest. Katseseeria käigus katsetati igas sihis 3 kuupi, mida oli hoitud kuivades tingimustes ning 3 kuupi, mis hoiti vees ning määrati lisaks ära pehmenemiskoeffitsient. Lisaks sellele tehti ka suundade 1 ja 2 sihiliste kuupide katse, kus jäeti alles prinditud ribilised küljed. Katsetulemustest selgus, et sarnaselt varem tehtud uuringutele on printimise suunal oluline mõju katsekehade survetugevusele – täpsem käsitlus peatükis 3.3.

Uuringus katsetati 7 õõnesposti ja 3 kihilist seinaelementi. Postid purustati kahel järjestikusel päeval. Esimesed 2 posti siis, kui alumised kihid olid kivilinenud 14 päeva, keskmised kihid 13 päeva ning ülemised kihid 12 päeva. Sõltuvalt hooldustingimustest võib joonise 3.1 järgi eeldada, et kihtide vanuse erinevused pole määrava tähtsusega. Järgmised 5 posti purustati hetkel, kui alumised kihid olid kivilinenud 15 päeva, keskmised kihid 14 päeva ning ülemised kihid 13 päeva. Seinaelemendid purustati kõik samal päeval, selleks ajaks olid alumised kihid olid kivilinenud 16 päeva, keskmised kihid 14 päeva ning ülemised kihid 13 päeva.

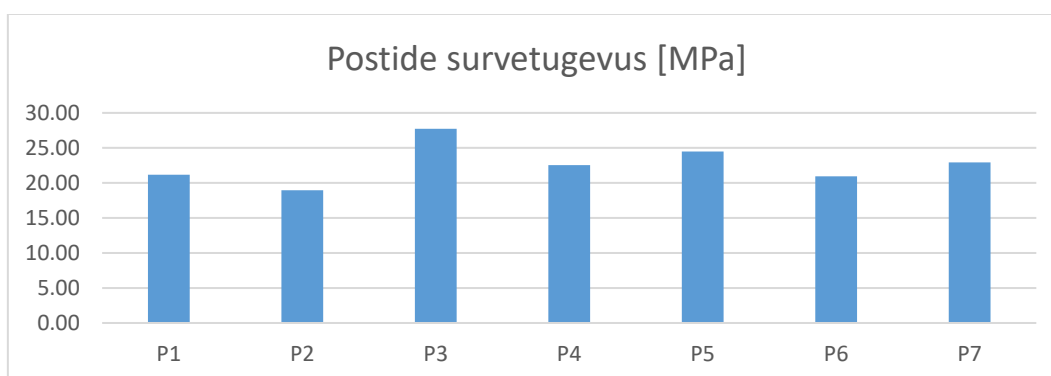
3.1 3D prinditud postide koormuskatsed

3.1.1 Postide katseline ja arvutuslik kandevõime

Postide koormuspindala arvutati neopreeni muljutud pinna järgi – kõikidele katsekehadele paigutati 150 mm laiune neopreeni riba, aga kuna prinditud seinalaius oli muutlik, siis koormuspindala oli katsekehati erinev. Tabel 3.1 arvutatud survetugevus on arvutatud postide purustava koormuse ning koormuspindala suhtena. Katsetel selgus, et kõige suurem posti kandevõime oli 279,2 kN ning kõige madalam 239,0 kN. Keskmise posti kandevõime oli 260,4 kN. Postide puhul tuli keskmine kontaktpinna pinge 22,7 MPa, ning väiksemõõtmelistel kuubi katsetel 20 MPa ehk suuremõõtmeliste kehade vastuvõetav pinge kontaktpinnal oli vaid pisut suurem. See võib olla tingitud sellest, et külgsihis liikumine vahetult kontaktpinna all oli katsekehadel katsekeha kujust ja kontaktpinna laiusest tulenevalt tõkestatud.

Tabel 3.1 Postide purustav koormus

Katsekeha	Koormuspindala [mm ²]	Purustav koormus [kN]	Survepinge kontaktpinnal [Mpa]
1	12900	273,2	21,2
2	12600	239,0	19,0
3	9900	274,5	27,7
4	11100	250,2	22,5
5	11400	279,2	24,5
6	11400	238,6	20,9
7	11700	268,2	22,9
Keskmine:		260,4	22,7



Joonis 3.3 Survepinge postis koormusplaadi kontaktpinnal

Tabelis 3.2 on leitud Eurokood 2 [23] lihtsustatud arvutuste põhjal postide survekandevõime. Kuna katsetes on tegemist seest õõnsa ristlõikega ning element ei purunenud nõtketele, siis tehti eeldus eurokoodi arvutuses, et ristlõike kogukõrgus on võrdne kahekordse seina printimislaiusega ning ristlõike kogulaius on võrdne koormuspinnaga.

Tabel 3.2 Purustava koormuse ja arvutusliku kandevõime võrdlus

Katsekeha nr	Koormuspindala [mm ²]	Purustav koormus [kN]	Arvutuslik Kandevõime [kN]	Kandevõime varu [%]
P1	12900	273,21	220,10	19
P2	12600	238,95	213,26	11
P3	9900	274,51	151,70	45
P4	11100	250,21	179,06	28
P5	11400	279,16	185,90	33
P6	11400	238,63	185,90	22
P7	11700	268,23	192,74	28
Keskmine		260,41		

Selliste eelduste järgi arvutades selgus, et reaalne purustav koormus oli arvutuslikust kandevõimest kõikide katsekehade puhul tugevam. Keskmine varu elemendi kandevõime puhul oli 26,7 %.

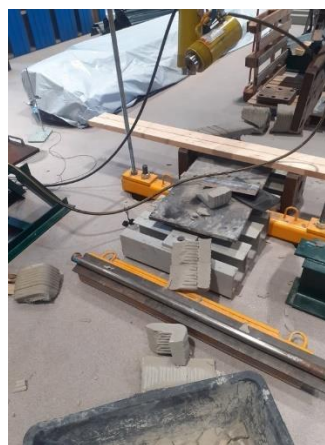
3.1.2 Postide purunemispiltide analüüs

Postide koormuskatsetel esinesid 3 purunemispilti (joonis 3.4) – ühe või kahepoolse muljumise puhul purunemine lõhestumisele ning nurga murdumine ühe poolsest muljumisest. Seitsmest katsekehast 5 purunes lõhestumise ning 2 purunes nurga murdumise tõttu. Lõhestunud katsekehade neljal juhul viiest muljuti koormusplaat katsekehasse ühepoolsest sisse ning ühel juhul tekkis horisontaalteljest 58° nurga all muljumisest „kiil”(joonisel vasakul), ning post purunes keskelt lõhestumisele.



Joonis 3.4 Postide purunemispildid – kiilu teke koos lõhestumispurunemisega (vasakul), ühepoolne muljumine koos lõhestumispurunemisega (keskel), nurga murdumine ühepoolsest muljumisest (paremal)

Varasemates katsetes, mis on katsetatud kogu katsekeha horisontaalpinna ulatuses näitasid, et esmalt tekkisid elementis praod ning seejärel katsekehad purunesid hapralt. Selle uurimuse postide katsed näitasid, et katsekehad purunesid hapralt ilma eelnevate pragude tekketa. Kõikide lõhestunud katsekehade puhul oli tegemist plahvatusliku purunemisega, kus kõige suurema jõu juures purunenud katsekeha puhul väiksemad betoonitükid lendasid kuni paari meetri kaugusele ning mõnel juhul suuremad betoonitükid kukkusid katseala vahetusse lähedusse (joonis 3.5).



Joonis 3.5 Katsekeha tükide paiknemine pärast plahvatuslikku purunemist

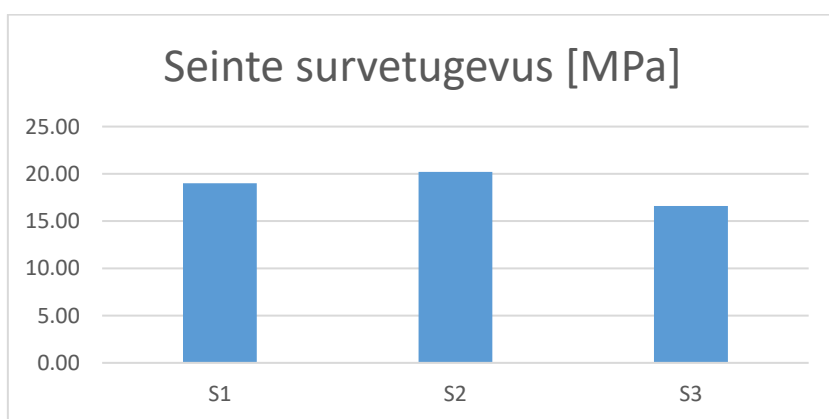
3.2 3D prinditud seinte koormuskatsed

3.2.1 Seinaelementide katseline ja arvutuslik kandevõime

Sarnaselt postidega, arutati ka seinte koormuspindala neopreeni muljutud pinna järgi. Katsekeha koormati seina elemendi tsentrist seina 150 mm pikkusel lõigul. Kõik seinaelemendid purunesid ühepoolse lokaalse muljumise tagajärjel. Purunemine oli habras ning enne purunemist pragusid ei tekkinud. Maksimaalne survepinge oli 20,2MPa ning minimaalne 16,6MPa. Kolme katsekeha keskmine purustav survetugevus oli 18,6MPa. Sarnaselt postidele, sobib kontaktpinge purunemisel ka siin seinast välja lõigatud katsekehade survetugevusega. Võrreldes postidega sai seintele rakendada suuremat koormust, aga pinge lokaalse koormuse jaotusplaadi all oli väiksem.

Tabel 3.3 Seinte purustav koormus ja pinge kontaktpinnal

Katsekeha	Koormuspindala [mm ²]	Purustav koormus [kN]	Survepinge kontaktpinnal [MPa]
S1	24150	459,1	19,0
S2	22950	463,6	20,2
S3	20700	343,6	16,6
Keskmine		422,1	18,6



Joonis 3.3 Seinte maksimaalne surve kandevõime

Tabelis 3.4 on leitud Eurokood 2 [23] lihtsustatud arvutuste põhjal seinte survekandevõime. Ristlõike kõrgus arutati lihtsustatuna kolmekordse prinditud seina kihi laiuse järgi.

Tabel 3.4 Purustava koormuse ja arvutusliku kandevõime võrdlus

Katsekeha nr	Koormuspindala [mm ²]	Purustav koormus [kN]	Arvutuslik Kandevõime [kN]	Kandevõime varu [%]
S1	24150	459.09	480.71	-5
S2	22950	463.6	453.35	2
S3	20700	343.59	402.05	-17
Keskmine		422.09		

Selliste eelduste järgi arvutades selgus, et reaalne purustav koormus oli arvutuslikust kandevõimest kahel juhul madalam ning ühel juhul kõrgem. Arvutusliku ja purustava koormuse täpsus oli sein 1 ja 2 korral väga lähedane ning sein 3 korral erines 17 %. Viimasel oli ka printimisel kõige rohkem ebatäpsuseid, mis võis mõjutada seina kandevõimet. Üleüldiselt on võimalik selliste seina ristlõigete juures antud arvutusmetoodikat kasutada ligilähedaste tulemuste saamiseks.

3.2.2 Seinte purunemispiltide analüüs

Seinte koormuskatsetel purustati kokku 3 seinaelementi. Kõikidel juhtudel oli purunemispilt sarnane – sees olev „sik-sak“ struktuur lõhestus ning seina väliskihid purunesid muljumisele. Sarnaselt postidega oli purunemine habras, ilma varaste pragude tekketa. Seina kandevõime ammendumisel tekkisid katsekehas vertikaalpraod lokaalse koormuse nurkadest ning samast kohast said alguse ka diagonaalpraod 45°-60° nurga all. Pragude maksimaalne avanemine ulatus ühe millimeetrini. Purunemisel suuremaid tükke ei tekkinud – purunemine oli ainult lokaalne (joonis 3.7).



Joonis 3.7 Seinte purunemispilt

3.2.3 Seinte ja postide geomeetriliste ebatäpsuste analüüs

Betooni 3D printimisel mõjutavad seina geometriat suur hulk muutujaid – betoonisegu koostis ja omadused, betoonisegu pumbas viibmise aeg, printimise kiirus, kihtide kõrgus ja arv, ettevalmistatud mudel ning järjestikuste kihtide printimise vaheline aeg. Selles töös hinnati seinte ja postide geometriat pärast printimist ning pärast purustamist.

Elementide printimise ajal vaadeldi printimise mõju elemendi geometriale. Seinaelementide puhul tehti elemendi sisse „sik-sak“ struktuur, tugevdamiseks ristlõiget nii survetugevusele kui väljanõtkumisele. Tulenevalt printimiseggu prinditavuse muutusest ajas esinesid muutused prinditava kihi laiuses ning sellega seoses oli valitud kohati liiga kiire printimiskiirus selliselt, et kihid lükkasid üksteise sisse sõites geometriat vertikaaltelje suhtes viltu – see aga tingis kahe kihi liitumisel üksteisega tugevama nakke. Teisel juhul puutusid prinditud kihid vaevalt üksteisega kokku ning kõrvuti kihtide vahel ühtlast kokkupuutepinda ei saavutatud (joonis 3.8).

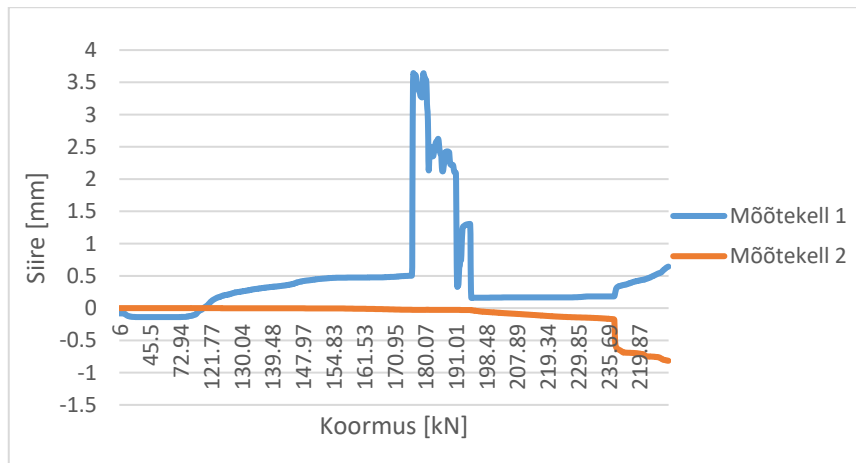
Pärast purustamist vaadeldi ristlõike kihtide vahelisi laiuseid ning visuaalsel vaatlusel hinnati, kas kihtide eraldumist esines väikese kandevõimega katsekehadel rohkem. Selgus, et nake erinevatel päevadel prinditud kihtide vahel oli võrreldes samal päeval prinditud kihtide vahelise nakkega tunduvalt nõrgem. See võis olla tingitud sellest, et katsekehasid ei niisutatud ega kaetud, seega järgmisel päeval printimist jätkates olid katsekehad juba välja kuivanud. Uute kihtide peale printimisel hakkasid alumised välja kuivanud kihid värskelt betoonisegust vett endasse imama, mis omakorda tingis nakke tugevuse vähenemise nende kahe kihi vahel (Joonis 3.8).



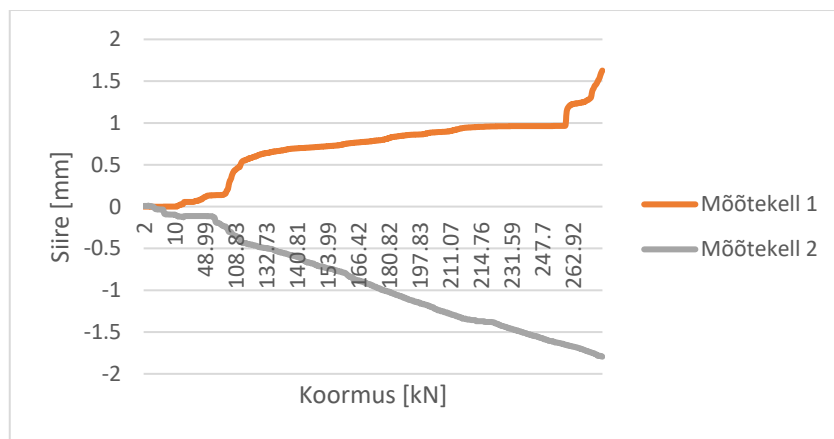
Joonis 3.8 Katsekehade geomeetrilised ebatäpsused. Prinditud ristlõike geometria ja erinevatel päevadel prinditud betooni mõju nakketugevusele (vasak), prinditud kihi laiuse mõju ristlõike seotusele (paremal).

3.2.4 Elementide siirde sõltuvus koormusest

Koormuskatsete ajal mõõdeti katsekehadel horisontaalseid siirdeid, et näha kas elemendid hakkavad selliste kõrguste juures välja nõtkuma või laiali vajuma. Mõõtekellade positiivse suuna lugemid näitavad elemendi siirdeid katsekehast välja poole ning negatiivsed lugemeid katsekeha tsentri suunas. Vertikaalsuunalisi siirdeid ei mõõdetud. Pärast koormuskatseid analüüsiti koormamise mõju siiretele – selgus, et katsete ajal elemendi deformatsioonide ja mõõtekellade nihkumise tõttu ei saadud korrektseid lugemeid (joonis 3.9). Selliste elemendi mõõtude juures katsekehad nõtketundlikud ei olnud.



Joonis 3.9 Katsekeha siire ära vajunud mõõtekella puhul



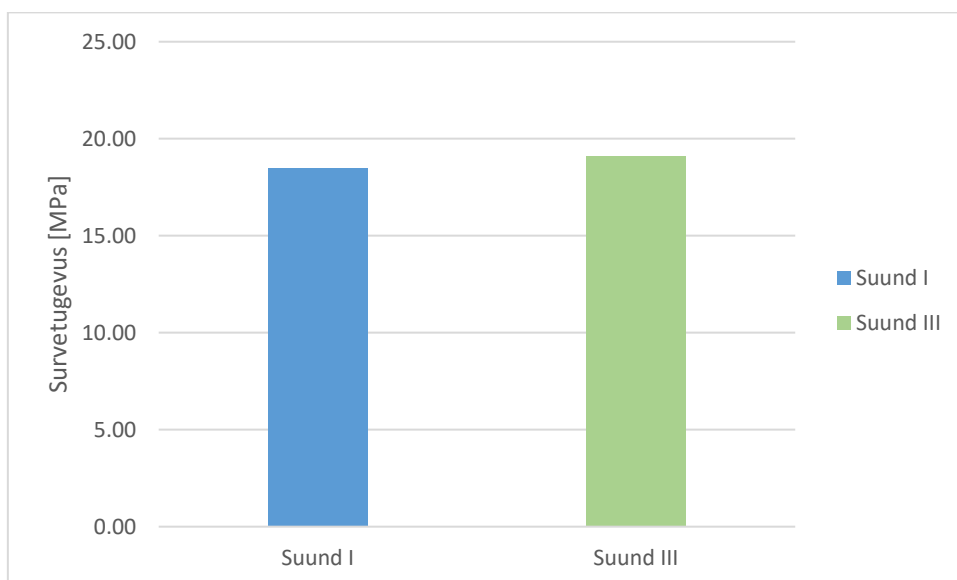
Joonis 3.10 Katsekeha reaalse siire katsekeha ühele poole vajumisest

3.3 Betooni tugevusparameetrite määramine

Pärast õõnsate postide ja seinte katseseeriat lõigati katsekehade purunemiseta osadest välja 27 katsekeha – kolm 35x35x140 mm prismat paindekatse jaoks, üheksa 50x50x50 mm kuupi kuivades tingimustes survepinge määramiseks, üheksa 50x50x50 mm kuupi märgades tingimustes survepinge määramiseks ning kuus kuupi ribiliste servadega survetugevuse määramiseks (3 kuupi suund 1 ja 3 kuupi suund 3). Lisaks sellele määrati survekuupide katseseeriade põhjal printimisbetooni pehmenemiskoefitsient.

3.3.1 Survetugevus ribiliste katsekehade puhul

Ribilised katsekehad tehti suundades 1 ja 3 – suund 2 sihiliste katsekehade tegemine polnud otstarbekas, sest selliselt oleks pidanud koormuspinnana kasutama ribilist pinda. Suund 1 puhul oli keskmine survetugevus 18,5 MPa ning suund 3 puhul 19,1 MPa (joonis 3.11). Keskmiste tulemuste põhjal saab järeldada, et ribiliste katsekehade puhul suunal pole olulist mõju, kui me aga vaatame katsekehade tugevuste hajuvust, siis suund 1 puhul maksimaalne survetugevus oli 19,3 MPa ning minimaalne 18,0 MPa. Suund 3 puhul maksimaalne tulemus oli 21,7 MPa ning minimaalne 14,9 MPa. Sellest järeldub, et suund 3 hajuvus oli suurem, kui suund 1 puhul ning täpsemaks survetugevuse määramiseks tuleks katseseeriat suurendada.



Joonis 3.11 Ribidega kuupide survetugevus suund 1 ja 3 sihtides

Katsekehad purunesid olenemata koormamise sihist kas ribi servast nõrgestatud ristlõike kõrvalt või tekkis läbiv kaldpragu läbi kogu kuubi (joonis 3.12). Katsekehade survepinnad olid enne survekatsset siledaks lihvitud, et ei tekiks koormuspinnal pingekontsentraatorit.



Joonis 3.12 Ribidega kuupide purunemispildid suund I sihis

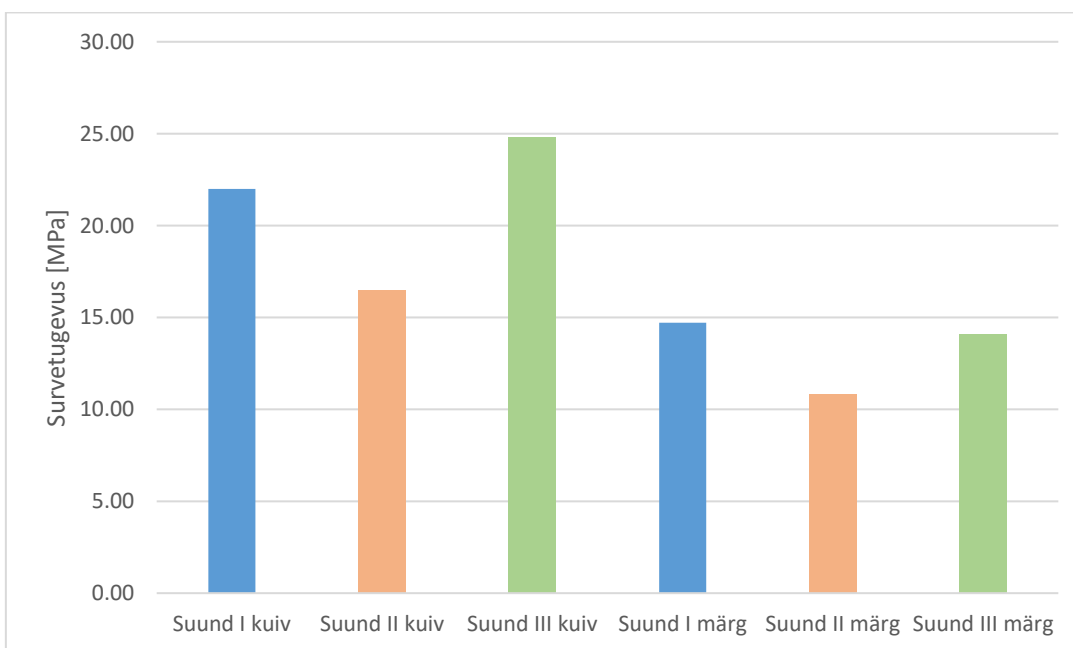
3.3.2 Survetugevus siledate servadega kuupidel

Igas sihis siledate servadega kuupidest tehti 2 seeriat, üks mille käigus vaadeldi kuivades tingimustes hoitud kuupide survetugevust ning teine, mille käigus pandi katsekehad enne purustamist 24 tunniks vette. Viimase puhul võeti katsekehad enne purustamist veest välja ning lasti neil 10 minutit kuivada.

Kuivades tingimustes katseseeria puhul olid kõige tugevama survetugevusega suund 3 sihilised kuubid, kus keskmine survetugevus oli 24,8 MPa. Mõnevõrra nõrgema tugevusega oli suund 1, mille keskmine survetugevus oli 22,0 MPa. Tunduvalt nõrgem mõlemast suunast oli suund 2, keskmise survetugevusega 16,5 MPa. Vaadeldes katseseerias olnud kuupide maksimaalseid survetugevusi, siis suund 3 kõige tugevam katsekeha oli 27,4 MPa, suund 1 26,6 MPa ning suund 2 19,53 MPa. Kõige nõrgemad katsekehad olid suund 1 16,3; suund 2 13,6 ning suund 3 22,75 MPa. Kuna suund 1 ja suund 3 kuubid olid sarnaste tugevustega, aga suund 1 puhul üks katsekeha oli suund 3 omast tunduvalt nõrgem, siis võis olla üks katsekehadest defektne ning reaalne survetugevus nendes sihtides oluliselt ei erine. Uuringust tuleb aga välja, et suund 2 on teiste suundadega võrreldes tunduvalt nõrgem (joonis 3.13).

Märgades tingimustes kivistatud kuupidel võib märgata täpselt samasid tendentse nagu kuivades tingimustes kivistatud kuupidel. Suund 1 ja suund 3 tugevused olid tugevuste poolest sarnased ning suund 2 oli märgatavalt nõrgem. Suund 1 keskmine survetugevus oli 14,7 MPa, suund 2 10,8 MPa ning suund 3 14,1 MPa (joonis 3.13). Kuivades tingimustes kuupidel oli purustamise hetkel veesisaldus 2,3 %.

Lisaks survetugevuste määramisele arutati materjali pehmenemiskoeffitsient iga suuna kohta eraldi. Pehmenemiskoeffitsient määrati protsentides, näidates palju niisked katsekehad on nõrgemad kuivadest katsekehadest. Arvutustest järelendus, et suund 1 katsekehade pehmenemiskoeffitsient tuli 33,1 %, suund 2 puhul 34,4 % ja suund 3 puhul 43,3 %.



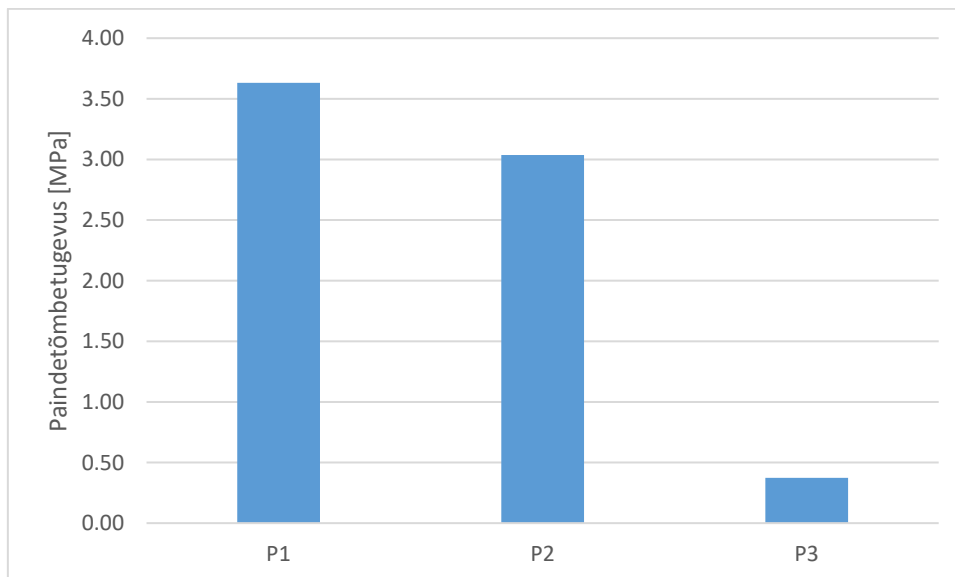
Joonis 3.13 Kuivades ja märgades tingimustes purustatud kuupide survetugevus



Joonis 3.14 Kuivades ja märgades tingimustes purustatud kuupide purunemispildid

3.3.3 Paindetõmbetugevuse määramine

Paindetõmbetugevuse määramise jaoks lõigati välja 3 prisma mõõtudega 35x35x140 mm. Paindekatsed tehti tugevate vahelise kauguse 105 mm juures. Paindekatseskehad lõigati suund 1 sihis. Kõik paindekatsed tehti koormamiskiiruse 0,2 MPa/s juures ning paindetõmbetugevus arvutati standardi EVS-EN 12390-5:2019 juhiste põhjal. [24] Maksimaalne paindetõmbetugevus saadi 3,6 MPa ning minimaalne 0,4 MPa – olenemata väga nõrgast viimase katse tulemusest tundus katsekeha visuaalsel vaatlusel olema defektideta, küll aga oli ülemise ja alumise külje mitteparalleelsus suur. Katsekehad P1 ja P2 purunesid keskelt risti katsekehaga, aga katsekeha P3 purunes 60° nurga all toe suunas (joonis 3.16).



Joonis 3.15 Katsekehade paindetõmbetugevus

Purunemispiltide kirjeldus



Joonis 3.16 Purunemispildid katsekeha P1 (vasakul) ja katsekeha P3 (paremal)

Betooni veesisalduse määramiseks kasutati purustatud katsekehasid (joonis 3.17). Selle jaoks puhastati purustatud pinnad lahtisest materjalist ning seejärel kaaluti. Pärast masside fikseerimist paigutati katsekehad 24 tunniks kuivatuskappi 60°C juures. Seejärel mõõdeti kuivatatud katsekehade mass. Materjali niiskus määrati arvutuslikult õhu käes olnud katsekehade massi ja kuivatatud katsekehade massi kaudu. Õhkuivade katsekehade niiskus oli 2,3 %.



Joonis 3.17 Purustatud paindekatskehad niiskuse määramiseks

Tabel 3.5 Uurimuse käigus leitud betooni iseloomustavad parameetrid

Betooni iseloomustavad parameetrid		
Betooni tugevusklass	C16/20	
Betooni tihedus	1836	kg/m ³
Betooni poorsus	11	%
Betooni paindetõmbetugevus	2,3	MPa
Betooni survetugevus suund I (kuiv)	22,0	MPa
Betooni survetugevus suund II (kuiv)	16,5	MPa
Betooni survetugevus suund III (kuiv)	24,8	MPa
Betooni survetugevus suund I (märg)	14,7	MPa
Betooni survetugevus suund II (märg)	10,8	MPa
Betooni survetugevus suund III (märg)	14,1	MPa
Pehmenemiskoeffitsient suund I	33,1	%
Pehmenemiskoeffitsient suund II	34,4	%
Pehmenemiskoeffitsient suund III	43,3	%

KOKKUVÕTE

Töö esimeses osas uuriti suuremõõtmeliste 3D prinditud seinte ja postide survetugevust lokaalsel tsentrilisel koormusel ning võrreldi katsekehade kandevõimet lihtsustatud arvutustega. Töö teises osas määrati materjali mehaanilisi omadusi: survetugevus tulenevalt kihtide suunast, paindetõmbetugevus, tihedus ja pehmenemiskoeffitsient.

Suuremõõtmeliste 3D prinditud betoonist seinte mehaaniliste omaduste uurimiseks prinditi kokku 7 õõnsat posti ning 3 seinat, mida koormati lokaalselt elemendi tsentris. 3D prinditud betoonist postid ja seinad purunesid hapralt ilma eelnevate pragude tekketa. Seitsmest katsetatud postist viis purunesid vertikaalselt lõhestudes ning kahel katsekehal eraldus nurk koormuse ekstsentrilisuse tõttu. Kõik kolm seinaelementi purunesid lokaalse muljumise tõttu.

Seintel oli keskmine survetugevus 18,6 MPa ning õõnespostidel 22,7 MPa. Seinte puhul andis kandevõime arvutus ligilähedaselt sarnase tulemuse kasutades kuubilist survetugevust, aga postidel oli tegelik kandevõime arvutuslikust keskmiselt 27 % suurem. Kandevõime kaotust ei mõjutanud postide ega seinte nõtkumine lähtuvalt katsetatud elementide saledusest.

Erinevatel päevadel pirnditud kihtide vaheline nakketugevus on väiksem, sest eelmine kiht oli osaliselt välja kuivanud ning imas järgmise kihi värskest betoonisegust niiskust. Selle vastu oleks võimalik eelmist kihti enne printimise jätkamist niisutada või suurendada keskkonna õhuniiskust.

Töö teises osas lõigati suuremõõtmelistest katsetest terveks jäänud osadest kuubid ja prismad survetugevuse ja paindetõmbetugevuse määramiseks. Survekuubid tehti nii ribiliste kui siledate servadega katsekehadega. Olenemata ribide säilimisest või eemaldamisest olid survetugevused suunas 1 ja 3 (suunad joonis 1.15) olid sarnased 22,0 ja 24,8 MPa vastavalt ning suunas 2 mõnevõrra nõrgem 16,5 MPa. Vees immutatud katsekehade survetugevuse järgi määratud pehmenemiskoeffitsient oli suunas 1 33%; suunas 2 34% ja suunas 3 43%. Paindekatsel saadi keskmiseks paindetõmbetugevuseks 2,3 MPa, kusjuures maksimaalne paindetõmbetugevus oli 3,6 MPa ning minimaalne 0,4 MPa. Viimase puhul võis katsekeha ülemine ja alumine pind olla niivõrd mitteparalleelsed, et see ületas pressi liigendi tööulatuse.

SUMMARY

This study was divided into two stages, in first stage the compressive strength of large-scale 3D printed walls and posts under uniaxial loading was investigated and were compared to simplified calculations. In the second stage of work, the mechanical properties of the material were determined: compressive strength due to the direction of the layers, flexural tensile strength, porosity and softening coefficient.

To study the mechanical properties of 3D printed concrete seven columns and three walls were printed. Specimens were loaded with the local force in the element center. The tests revealed that 3D printed concrete specimens exhibit a brittle failure without developing any cracks while loading. Five out of seven column specimens showed tensile splitting failure and two specimen failed in the corners due to local compression. All the wall elements failed due to local compression.

The average load-bearing capacity under uniaxial compression on the wall specimen were 18,6 MPa and on the hollow columns were 22,7 MPa. In the case of walls, the calculated capacity was approximately equal to the compressive strength, but the capacity of columns was on average 27% higher than the calculated one.

If specimens were 3D printed on different days, the adhesion between the layers was weaker as the lower layers of concrete had dried out and began to absorb moisture from the printed concrete mix. In order to prevent this, it would be possible to moisten the top layer before printing layers on hardened concrete or increase the humidity before resuming printing.

In the second stage of work, cubes and prisms were made from intact parts from the large-scale tests to determine compressive strength and flexural tension. In the compression test it turned out that direction 1 and 3 had similar compressive strength 22,0 MPa and 24,8 MPa respectively and direction 2 was slightly weaker at 16,5 MPa. A series of compression tests were performed on both wet and dry cubes in order to determine softening coefficient. It was found that the softening coefficient of the printed concrete was 33% in direction 1, 34 % in direction 2 and 43 % in direction 3. The flexural tension test gave an average tensile strength of 2,3 MPa and a minimum of 0,4 MPa.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. Pogga, juhendaja T.Tuisk, "3D printimisbetooni koostise alusuuring"
- [2] Viktor Mechtcherine, Venkatesh Naidu Nerella, Frank Will, Mathias Näther, Jens Otto, Martin Krause „Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing“ Autom. Constr. 107, November 2019, 102933
- [3] C. Gosselin, R. Duballet, Ph, Roux, N. Gaudilliere; J. Dirrenberger, Ph. Morel „Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders“ Materials & Design 100, 15 June 2016, pp 102-109
- [4] Suvash Chandra Paul, Gideon P.A.G van Zijl, Ming Jen Tan, Ian Gibson „A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects“ Rapid protocol journal 24, nr 4, 2018 pp 784-798
- [5] Jianzhuang Xiao, Guangchao Ji, Yamei Zhang, Guowei Ma, Viktor Mechtcherine, Jinlong Pan, Li Wang, Tao Ding, Zhenhua Duam, Shupeng Du „Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities“ Cement and Concrete Composites 122, September 2021, 104115
- [6] Raphael Comminal, Wilson Ricardo Leal da Silva, Thomas Juul Andersen, Henrik Stang, Jon Spangenberg „Modelling of 3D printing based on computational fluid dynamics“ Cement and Concrete research 138, December 2020, 106256
- [7] Pshtiwan Shakor, Shami Nejadi, Gavin Paul „A study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar“ Materials 2019, 12, 1708; doi:10.3390/ma12101708
- [8] Guangchao Ji, Jianzhuang Xiao, Peng Zhi, Yu-Ching Wu, Nv Han „Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates“ Construction and Building Materials 325, March 2022, 126740
- [9] Wenxin Lao, Mingyang Li, Tegoeh Tjahjowidodo „Variable-geometry nozzle for surface quality enhancement in 3D concrete printing“ Additive Manufacturing 37, January 2021, 101638
- [10] Elena Ferretti, Massimo Moretti, Alberto Chiusoli, Lapo Naldoni, Francesco de Fabritiis, Massimo Visona „Mechanical Properties of a 3D-Printed Wall Segment Made with an Earthen Mixture“ Materials 2022, 15, 438 <https://doi.org/10.3390/ma15020438>

- [11] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12350-5:2019 – Betoonisegu katsetamine Osa 2: Vajumiskatse“
- [12] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12350-5:2019 – Betoonisegu katsetamine Osa 5: Valguvuskatse“
- [13] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 196-3:2016 – Tsemendi katsetamine Osa 3: Tardumisaja ja mahupüsivuse määramine“
- [14] A.S.J Suiker, R.J.M Wolfs, S.M. Lucas, T.A.M Salet “Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing” Cement and Concrete research 135, September 2020, 106016
- [15] Vuong Nguyen-Van, H. Nguyen-Xuan, Birchadi Panda, Phuong Tran “3D concrete printing modelling of thin-walled structures” Structures 39, May 2022, pp 496-511
- [16] R.J.M. Wolfs, F.B Bos, T.A.M Salet “Hardened concrete properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion” Cement and Concrete research 119, May 2019, pp 132-140
- [17] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12390-1:2021 – Kivistunud beetooni katsetamine Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded“
- [18] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12390-3:2019 – Kivistunud beetooni katsetamine Osa 3: Katsekehade survetugevus“
- [19] Chao Liu, Rongfei Zhang, Huawei Liu, Chunhui He, Youqiang Wang, Yiwen Wu, Shuhua Liu, Lin Song, Fan Zuo “Analysis of the mechanical performance and damage mechanism for 3D printed concrete based on pore structure” Construction and Building materials 314, January 2022, pp 125572
- [20] Guowei Ma, Ruhan A, Panpan Xie, Zhu Pan, Li Wang, James C. Hower “3D printable aerogel-incorporated concrete: Anisotropy influence on physical, mechanical, and thermal insulation properties” Construction and Building materials 323, March 2022, pp 126551

- [21] Totsawat Daungwilailuk, Phoosak Pheinsusom, Withit Pansuk "Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis" *Construction and Building materials* 275, March 2021, 122039
- [22] Xiaoyu Han, Jiachuan Yan, Mingjian Liu, Liang Huo, Junlin Li "Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression" *Automation in construction* 133, January 2022, 103993
- [23] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 1992-1-1:2007 – Eurokoodeks 2: Betoonstruktsioonide projekteerimine Osa 1-1: Üldreeglid ja reeglid hoonetele“
- [24] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12390-5:2019 Kivistunud betooni katsetamine Osa 5 Katsekehade paindetõmbetugevus“
- [25] Eesti standardimis- ja akrediteerimiskeskus „EVS-EN 12390-6:2009 Kivistunud betooni katsetamine Osa 6 Katsekehade lõhestustõmbetugevus“

LISAD

Lisa 1.1 Varasemate uuringute tehniline info, retseptid ja keskmised survetugevused

Betonkuubikute survetugevus		
Jrk nr	Survetugevus [MPa]	
	Suund	28p
1	Suund I	28,5
2	Suund II / III	29,2
Referents	Tavatingimustel kuup	42,3

Tehniline info:		
Printimisel kihi kõrgus	9,5	mm
Printimise intervall kihtide vahel	15	s
Katsekehade mõõdud	40x40x40	mm
Koormamise kiirus	0,6	MPa/s
Katsekehade hooldus	Hooldatud kuubid (kaitstud väljakuivamise eest)	
Kihi laius	50	mm
Printeri tüüp	Ristkoordinaadistikus raam (Eindhoven)	

Betonisegu retsept	
Portland tsement CEM I 52,5R	
Silikaatliiv 0/1 mm	
Paekivi filler (peenosis)	
Lisandid + fiiber	
V/Ts tegur	0,495
Materjalide koguste kohta täpsem info puudu	

Lisa 1.2 Varasemate uuringute tehniline info, retseptid ja keskmised survetugevused

Betonkuubikute survetugevus			
Jrk nr	Survetugevus [MPa]		
	Suund	A5 28p	A10 28p
1	Suund I	29,2	26,6
2	Suund II	34,2	27,7
3	Suund III	38,0	33,0
Referents		39,9	33,6

Märkus: A5 ja A10 on erinevad retseptid tulenevalt peentäitematerjali mahust

Tehniline info:		
Printimisel kihi kõrgus	10	mm
Printimiskiirus	1600	mm/min
Katsekehade mõõdud	70,7x70,7x70,7	mm
Koormamise kiirus	0,5	mm/min
Katsekehade hooldus	Hooldatud kuubid (kaitstud väljakuivamise eest)	
Kihi laius	50	mm
Printeri tüüp	Teadmata	

Betonisegu retsept	
Tsement OPC 42,5 + peenräni (silica fume)	
Silikaatliiv ja silikaat aerogel (silica aerogel) maksimaalne osakese suurus 0,3 mm	
Superplastifikaator	
Veehoidvust suurendav lisand	
vesitsement tegur	0,445

Lisa 1.3 Varasemate uuringute tehniline info, retseptid ja keskmised survetugevused

Betonkuubikute survetugevus		
Jrk nr	Survetugevus [MPa]	
	Suund	28p
1	Suund I	26,9
2	Suund II	35,4
3	Suund III	28,2
Referents	Tavatingimustel kuup	47,0

Tehniline info:		
Printimisel kihi kõrgus	15	mm
Printimiskiirus	120	mm/s
Katsekehade mõõdud	100x100x100	mm
Koormamise kiirus	0,5-0,8	MPa/s
Katsekehade hooldus	Hooldatud kuubid (kaitstud väljakuivamise eest)	
Kihi laius	31,5	mm
Printeri tüüp	Ristkoordinaadistikus raam	

Betonisegu retsept	
Tsement OPC 42,5 + peenräni (silica fume)	
Silikaatliiv maksimaalne osakese suurus 3 mm	
Superplastifikaator	
Fiber, kiirendi	
vesitsement tegu	0,3

Lisa 2 Katsekehade purunemispildid ja siirdegraafikud

Katsekeha P2 purunemispilt

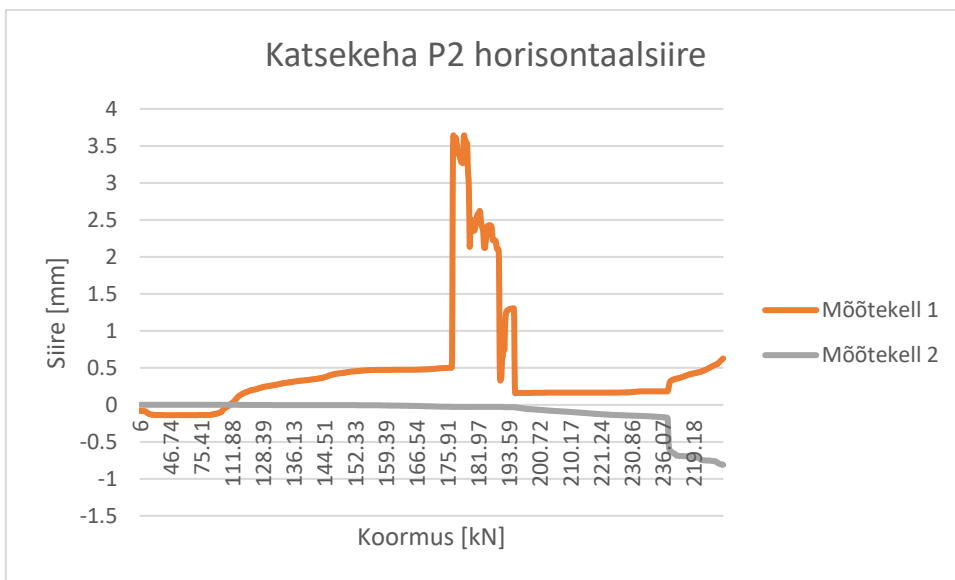


Kuna katsekeha 1 puhul olid mõõtekellade statiivid paigutatud elemendiga sama aluse peale ning mõõtekella lugemite tulemused ei andnud mingit ettekujutust siirete kohta, siis siirdegraafikut selle katsekeha kohta ei esitata.

Katsekeha P2 purunemispilt



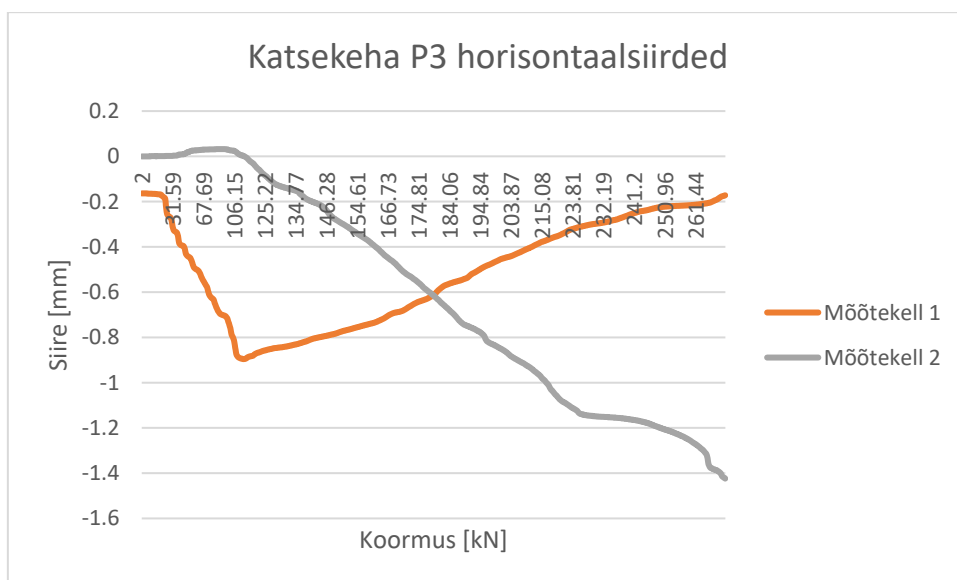
Katsekeha P2 siire graafik



Katsekeha P3 purunemispilt



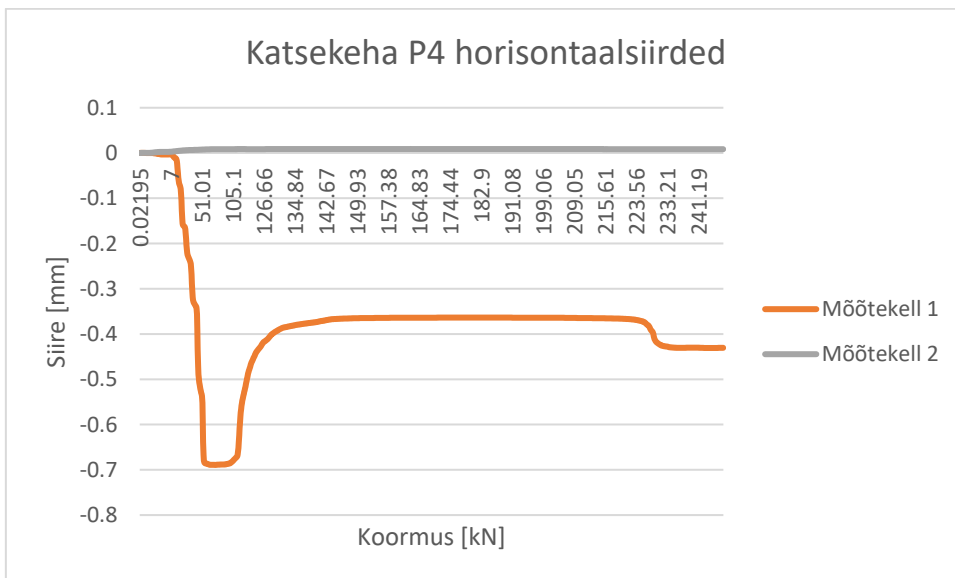
Katsekeha P3 siirete graafik



Katsekeha P4 purunemispilt



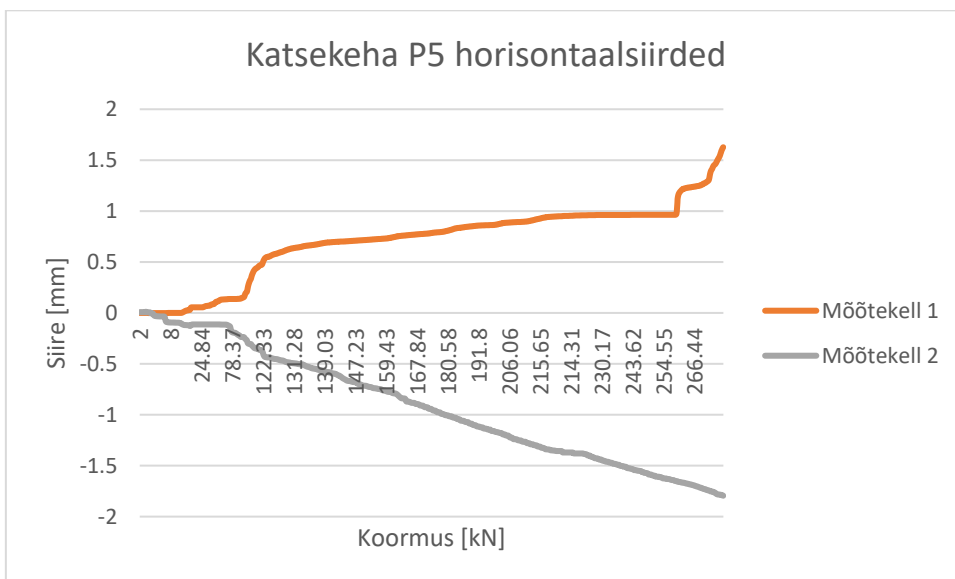
Katsekeha P4 siirete graafik



Katsekeha P5 purunemispilt



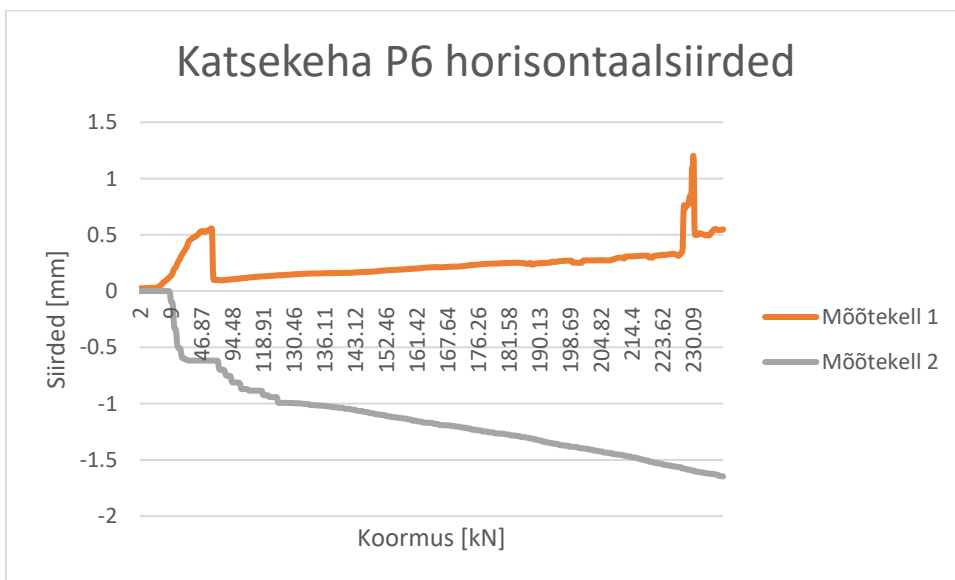
Katsekeha P5 siirete graafik



Katsekeha P6 purunemispilt



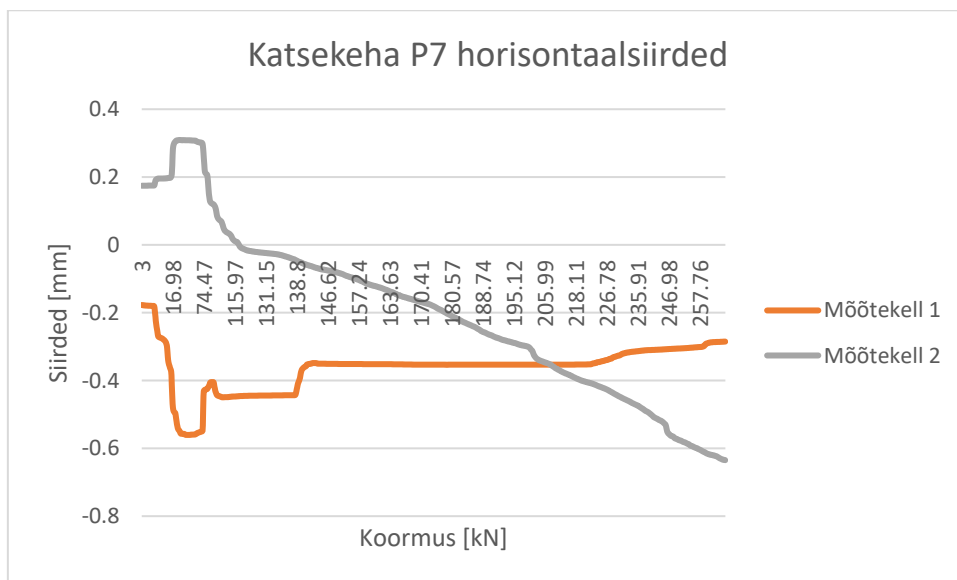
Katsekeha P6 siirete graafik



Katsekeha P7 purunemispilt



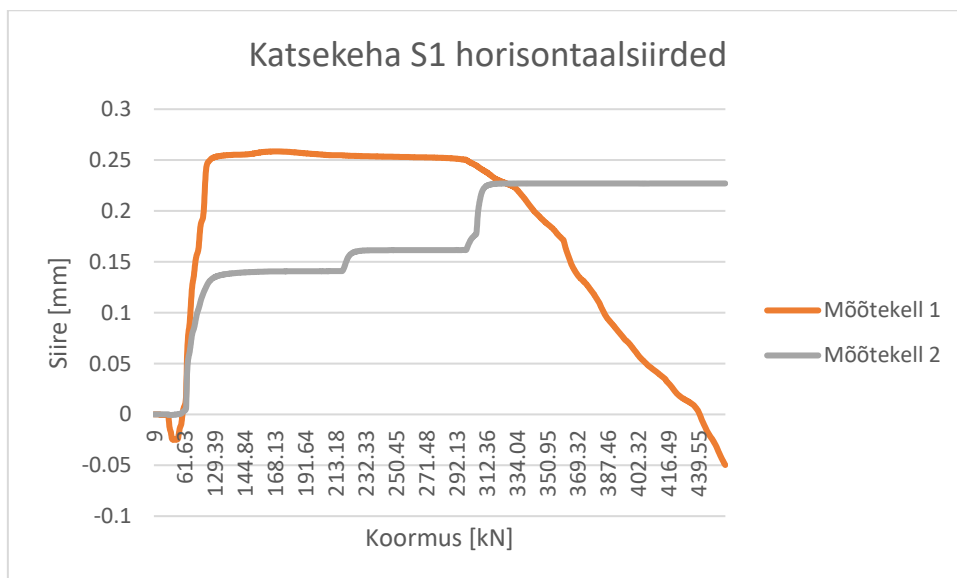
Katsekeha P6 siirete graafik



Katsekeha S1 purunemispilt



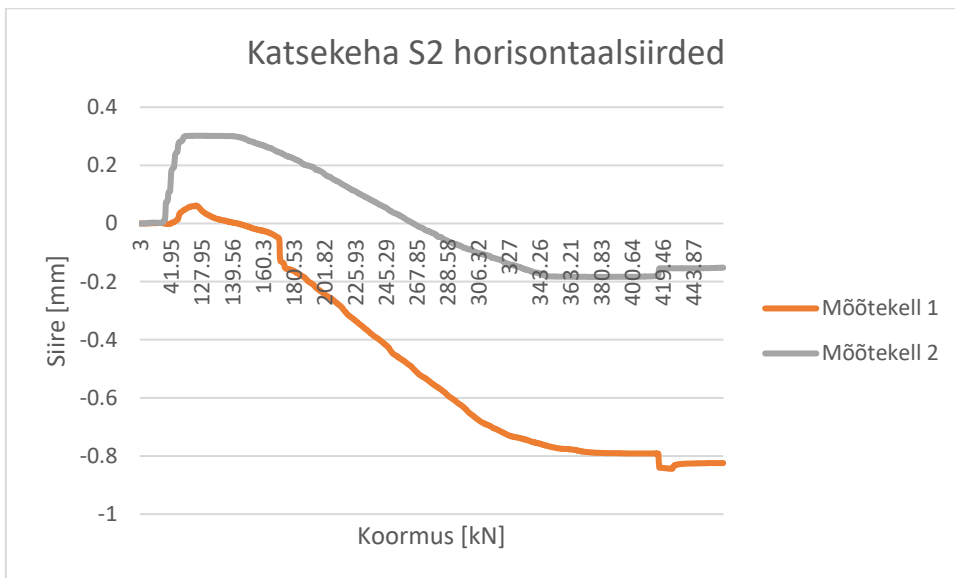
Katsekeha S1 siirete graafik



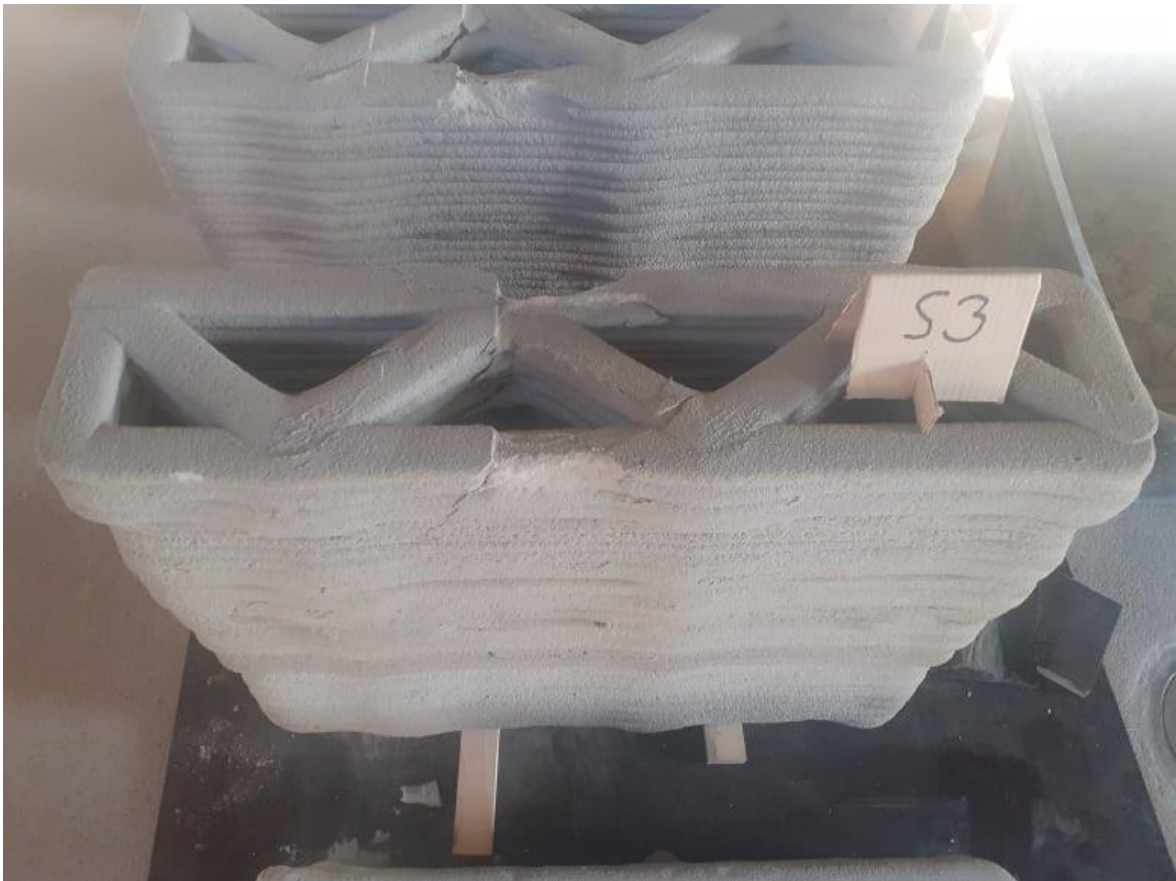
Katsekeha S2 purunemispilt



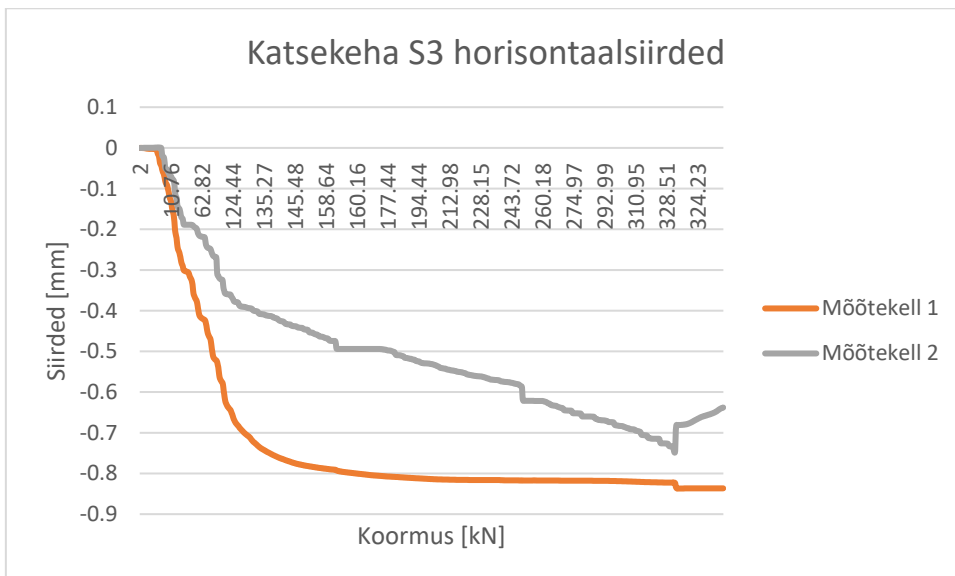
Katsekeha S2 siirete graafik



Katsekeha S3 purunemispilt



Katsekeha S3 siirete graafik



Lisa 3 Elementidest lõigatud kuupide survetugevused

Märjad katsekehad	Arvutuslikud keskmised mõõdud			Katsekehade	Koormus	Purustav	Surve pinge	Sihi
Katsekeha nr	pikkus	laius	kõrgus	mass kuivalt g	pindala	koormus kN	Mpa	keskmine
Suund I märg	S-1-I	50.2	51.05	49.15	232.2	2562.71	37.11	14.48
	S-2-I	49.55	50.05	48.55	221.8	2479.9775	35.1	14.15
	S-3-I	49.25	49.05	49	215.2	2415.7125	37.44	15.50
Suund II märg	S-1-III	51.6	49.2	47.85	220.2	2538.72	23.04	9.08
	S-2-III	51.7	52	47.05	231.2	2688.4	33.71	12.54
	S-3-III	53.8	53	50.65	260	2851.4	31.02	10.88
Suund III märg	S-1-II	49	49.55	50.1	221.9	2427.95	41.13	16.94
	S-2-II	49.75	50.05	49.95	220.6	2489.9875	28.32	11.37
	S-3-II	50	48.55	50.6	225.2	2427.5	33.71	13.89
Kuivad katsekehad	Arvutuslikud keskmised mõõdud			Katsekehade	Koormus	Purustav	Surve pinge	Sihi
Katsekeha nr	pikkus	laius	kõrgus	mass g	pindala	koormus kN	Mpa	keskmine
Suund I kuiv	S-1-I	51.3	50	49.25	237.1	2565	41.86	16.32
	S-2-I	49.4	49.85	48.55	219.8	2462.59	56.71	23.03
	S-3-I	48.55	50	50	226.8	2427.5	64.68	26.64
Suund II kuiv	S-1-II	52.5	50.95	48.9	243.2	2674.875	52.23	19.53
	S-2-II	49.6	52.05	51.4	239.6	2581.68	35.21	13.64
	S-3-II	51.65	48.75	51.45	241.5	2517.9375	41.14	16.34
Suund III kuiv	S-1-III	50.05	50.2	49.45	228.2	2512.51	57.16	22.75
	S-2-III	51.25	51.1	49.7	243.3	2618.875	71.68	27.37
	S-3-III	49.95	53.35	51.05	251.1	2664.8325	64.88	24.35
ribilised katsekehad	Arvutuslikud keskmised mõõdud			Katsekehade	Koormus	Purustav	Surve pinge	Sihi
Katsekeha nr	pikkus (rubi)	laius	kõrgus	mass g	pindala	koormus kN	Mpa	keskmine
Suund I	SR-1-I	49.95	48.7	50.5	225.4	2432.565	44.05	18.11
	SR-2-I	49.65	48.75	48.85	218.8	2420.4375	43.53	17.98
	SR-3-I	53.3	51.4	48.1	241.2	2739.62	52.99	19.34
Suund III	SR-1-III	56.7	48.65	50.95	262.6	2758.455	59.77	21.67
	SR-2-III	53.4	49.45	51.85	246.6	2640.63	54.63	20.69
	SR-3-III	52.8	51.6	49.85	237.4	2724.48	40.54	14.88