



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Tartu kolledž

## **3D PRINDITAVA BETOONI KIRJANDUSLIK ANALÜÜS JA TUGEVSOMADUSTE MÄÄRAMINE**

### **LITERATURE ANALYSIS OF 3D PRINTING CONCRETE AND ASSESSMENT OF STRENGTH PROPERTIES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Aleksandra Bodrenkova

Üliõpilaskood: 165266EAEI

Juhendaja: Mihkel Kiviste

Kaasjuhendaja: 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.

“13” august 2021.

Autor: Aleksandra Bodrenkova

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“13” august 2021.

Juhendaja: Mihkel Kiviste

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaasjuhendaja: Mattias Põldaru

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“13” august 2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina Aleksandra Bodrenkova

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „3D prinditud betooni kirjanduslik analüüs ja tugevusomaduste määramine“

mille juhendajad on Mihkel Kiviste ja 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.

---

/ allkirjastatud digitaalselt /

13. august 2021

**TalTech Tartu kolledž**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Aleksandra Bodrenkova, 165266 EAEI  
Õppekava, peeriala: EAEI02/12Tartu – Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine  
**Juhendaja(d):** Mihkel Kiviste, mihkel.kiviste@taltech.ee  
Mattias Põldaru, mattias.poldaru@taltech.ee  
**Konsultandid:** Tanel Tuisk, tanel.tuisk@taltech.ee  
Aime Ruus, aime.ruus@taltech.ee

**Lõputöö teema:**

*3D prinditava betooni kirjanduslik analüüs ja tugevusomaduste määramine*

Literature analysis of 3D printing concrete and assessment of strength properties

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Välja selgitada 3D prinditava betooni koostise tuginedes kirjanduse analüüsile
2. Viia läbi katse ühe 3D prinditava betooni seguga

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

<b>Nr</b>	<b>Ülesande kirjeldus</b>	<b>Tähtaeg</b>
1.	Kirjandusega tutvumine	31.31.2021
2.	Esialgse info kogumine ja lõputöö kirjutamine	10.05.2021
3.	Kirjanduse analüüs ja selle vormistamine	24.05.2021
4.	3D prinditava betooniseгу ettevalmistamine ja printimine	21.06.2021
5.	Paindekatse, tõmbekatse, survekatse	19.07.2021
6.	Lõputöö vormistamine	06.07.2021

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13" august 2021.a

**Üliõpilane:** Aleksandra Bodrenkova /allkirjastatud digitaalselt/ "13" august 2021.a

**Juhendaja:** Mihkel Kiviste /allkirjastatud digitaalselt/ "13" august 2021.a

**Kaasjuhendaja:** Mattias Põldaru /allkirjastatud digitaalselt/ "13" august 2021.a

# Sisukord

EESSÕNA .....	7
1. SISSEJUHATUS .....	9
2. 3D PRINTIMINE .....	11
2.1. 3D printimise ajalugu .....	11
2.2. 3D printimistehnoloogiad .....	12
2.2.1. Sulatatud sadestumise modelleerimine .....	12
2.2.2. Laserpaagutamine .....	12
2.2.3. Stereolitograafia .....	12
2.2.4. Digitaalne valgustöötlus.....	12
2.2.5. Pidev vedelate liideste tootmine.....	12
2.2.6. Lamineeritud objekti valmistamine.....	12
2.2.7. Mitme joaga modelleerimine.....	13
2.2.8. Elektronkiirsulatus .....	13
3. BETOONIGA 3D PRINTIMISE MÕISTED JA PÕHIMÕTTED .....	14
3.1. Betooniga 3D printimise protsess .....	14
3.2. 3D prinditud betooni omadused .....	16
3.3. 3D prinditud betooni potentsiaal .....	17
3.4. 3D prinditud betooni kasutamise raskused ja väljakutsed.....	18
3.4.1. Betooni nõuded 3D printimise jaoks .....	18
3.4.2. Struktuuri terviklikkus ja anisotroopsed omadused.....	18
3.4.3. Järeltöötlemine.....	18
3.4.4. Horisontaalsete konstruktsioonide printimine.....	18
3.4.5. Väljaulatuvate konstruktsioonide printimine .....	20
3.4.6. 3D prinditud betooni armeerimine.....	20
3.5. 3D PRINDITUD BETOONI PROJEKTID MAAILMAS.....	21
3.5.1. Sillad ja väiksemad konstruktsioonid .....	21
3.5.2. Project Milestone .....	23
4. MAAILMAS LÄBI VIIDUD KATSETE KIRJELDUSED .....	25
4.1. Koostise väljatöötamine peamiste 3D prinditava betooni omaduste põhjal.....	25
4.1.1. Ekstrudeeritavus.....	26
4.1.2. Töödeldavus.....	26
4.1.3. Kasutatavusaeg .....	28
4.1.4. Ülesehitatavus.....	31
4.1.5. Kokkuvõte .....	32
4.2. 3D printitud betooni ja tavabetooni survetugevuste võrdlus.....	33
4.3. Betoonist 3D prinditud õõnesseina koostise väljatöötamise katse kirjeldus .....	35

4.3.1.	Vee ja tsemendi vahekord.....	36
4.3.2.	Liiva kogus ja terasuurus .....	36
4.3.3.	PVA kiud .....	37
4.3.4.	Tugevuse kontrolli kirjeldus.....	38
5.	3D PRINDITUD BETOONI OMADUSTE JA KOOSTISE ANALÜÜS KIRJANDUSE PÕHJAL.....	39
5.1.	3D prinditud betooni omadustest .....	39
5.2.	3D prinditud betooni koostisest.....	40
5.2.1.	Sideained.....	40
5.2.2.	Täitematerjalid ehk agregaadid.....	41
5.2.3.	Lisandid.....	41
5.2.4.	Lisandid betooni omaduste parandamiseks.....	42
5.3.	Koostise analüüs.....	43
6.	MAGISTRITÖÖ KATSE.....	45
6.1.	Lähteandmed .....	45
6.2.	Katseplaan .....	46
6.3.	Katse käik: kuivainete segamine .....	46
6.4.	Katse käik: katsekehade printimine.....	47
6.4.1.	Kiududega betooniga printimine.....	47
1.1.1.	Kiududeta betooni printimine.....	50
6.5.	Katse käik: tugevuskatsed .....	51
6.5.1.	Kolme punkti paindekatse .....	51
6.5.2.	Kihtidevahelise tõmbetugevuse katse .....	57
6.5.3.	Survekatse.....	60
6.6.	Katsete tulemuste analüüs ja järeldused .....	64
6.6.1.	Printimine .....	64
6.6.2.	Paindekatse .....	65
6.6.3.	Tõmbekatse .....	66
6.6.4.	Survekatse.....	67
7.	KOKKUVÕTE .....	68
8.	SUMMARY .....	70
9.	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	72

## **EESSÕNA**

Antud lõputöö teema sõnastati töö autori algatusel ning andmed koguti teadusartiklitest. Andmete kogumise ja konsultatsioonidega abistasid lõputöö juhendaja professor Mihkel Kiviste ja konsultant dotsent Aime Ruus. Lõputöö raames viidi läbi katse, mille katseplaani pakkusid välja kaasjuhendaja Mattias Põldaru ja konsultant Tanel Tuisk. Töö koostati Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis ja Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide õppelaboris.

Lõputöö autori poolt kirjutatud analüüs on koostatud teadusartiklitest, katsete kirjeldustest ja lõputöö raames läbiviidud katsest lähtudes.

Töö autor on tänulik juhendajate ja konsultantide koostöö, abi ja aja eest lõputöö valmimisel.

Märksõnad: magistritöö, betoon, 3D printimine, analüüs, koostis

### **Lühendite ja tähiste loetelu**

3D (ingl. k. three-dimensional) – kolmedimensiooniline

SLA (ingl. k. stereolithography) – stereolitograafia

SLS (ingl. k. selective laser siltering) – laserpaagutamine

FDM (ingl. k. fused deposition modeling) – sulatatud sadestumise modelleerimine

DLP (ingl. k. digital light processing) – digitaalne valgustöötlus

CLIP (ingl. k. continuous liquid interface production) – pidev vedelate liideste tootmine

LOM (ingl. k. laminated object manufacturing) – lamineeritud objekti valmistamine

MJM (ingl. k. multi jet modeling) – mitme joaga modelleerimine

EBM (ingl. k. electron beam melting) – elektroonkiirsulatus

PVA (ingl. k. polyvinyl alcohol) – polüvinüülsetaat

GGBS (ingl. k. ground granulated blast-furnace) - jahvatatud granuleeritud kõrgahjuräbu



# 1. SISSEJUHATUS

3D prinditud betooni vastu tuntakse huvi, kuna arvatakse, et see on elujõuline alternatiiv tavapärasele betoonile, mis on enim kasutatav ehitusmaterjal maailmas. Kolmemõõtmeliselt prinditaval betoonil on potentsiaal olla keskkonnasäästlikum, võimaldada keerukamate elementide valmistamist ja automatiseerida betoonkonstruktsioonide valmistamist, mis omakorda ennetab töökohaga seotud riske.

Käesoleva magistritöö eesmärk on välja selgitada 3D prinditava betooni koostis kirjanduse analüüsi põhjal ja kontrollida ühe printimiseks sobiva segu tugevusomadusi. Välja selgitada 3D prinditava betooniga töötamise põhimõtted ning tööks vajalikud betooni omadused. Analüüsida läbiviidud katsed, mis on korraldatud 3D prinditud betooni omaduste ja koostise väljaselgitamiseks maailmas. Samuti analüüsida lõputöö raames korraldatud laborikatse tagajärjena saadud tulemusi.

Antud magistritöö on kirjandusel ja katsel põhinev uurimistöö, mille esimene peatükk tutvustab 3D printimise ajalugu ja tehnoloogiaid. Teine peatükk toob esile betoonist kolmemõõtmelise printimise mõisted ja põhimõtted. Selles osas selgitatakse betooniga printimise protsess ja betooniprinteri tööpõhimõtted. Samuti tuuakse välja 3D prinditud betooniga töötamisega eelised ja väljakutsed, milleks on betooni anisotroopsed omadused, betooni järeltöötlemine, horisontaalsete ja väljaulatuvate konstruktsioonide printimine ning betooni armeerimise võimalused.

Lisaks tuuakse teises peatükis välja 3D prinditud betoonist valmistatud projektid, mis on valminud maailmas ja on olnud uuenduslikud oma valdkonnas. Projektid ja ehitised, mis on panustanud 3D prinditud betooni rakendusse igapäevaselt kasutusel olevates konstruktsioonides.

Magistritöö kolmas peatükk toob esile kolm 3D betooniga läbiviidud katset. Esimesena kirjeldatakse katset, mis käsitleb kõiki betooni 3D printimisel tähtsaid segu omadusi, mis on vajalikud edukaks printimiseks ning nende põhjal jaotub katse nelja põhilisse ossa. Nendeks osadeks on ekstrudeeritavus, töödeldavus, ekstrudeerimise ajavahemik ja ülesehitatavus. Igas osas kirjeldatakse läbiviidud katsed, et määrata parim segu variant antud omaduse tagamiseks. Teisena tuuakse esile 3D prinditud betooni ja tavabetooni võrdlevat survekatset.

Kolmandana kirjeldatakse katset, mis käsitleb 3D prinditava betooni koostise väljatöötamist õnnesseina näitel. Kirjeldatud katse jaotub kolme ossa, millest esimeses määratakse printimiseks vajalik tsemendi ja vee vahekord. Teises osas võetakse aluseks eelmises katses väljavalitud vahekord ning sellele lisatakse erinevate terasuurustega liiva, et määrata sobiv liiva kogus ja terasuurus. Kolmandas ja viimases osas lisatakse kahes

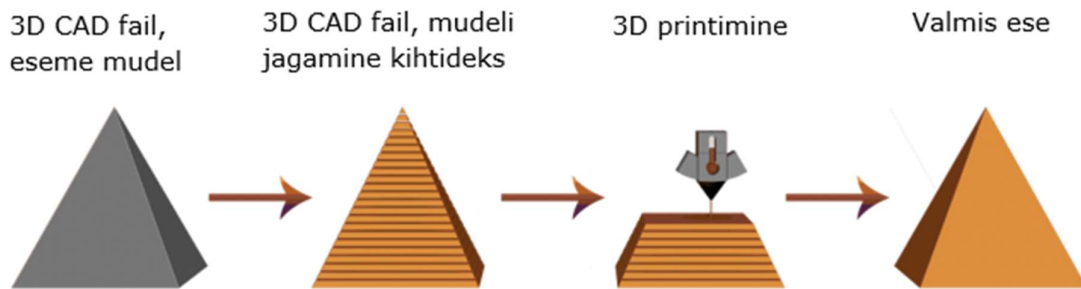
eelnevas osas edukamaks osutunud segusse PVA kiud, et suurendada segu kivistumise järgset tugevust. Lõpus kontrollitakse kahe sobivama segu survetugevust.

Neljandas peatükis analüüsitakse ja kirjeldatakse kokkuvõtlikult 3D prinditud betooniga töötamise põhimõtteid, selgitatakse välja lisandid ja koostisosade proportsioonid, mille muutmisega saab mõjutada 3D prinditud betooni omadusi. Samuti analüüsitakse eelmises peatükis kirjeldatud katsete tulemusi.

Viiendas peatükis kirjeldatakse magistritöö raames läbiviidud katset. Kirjeldatakse katses kasutatud betooni koostist ning segu ettevalmistamist koos printimise protsessiga. Seejärel selgitatakse läbiviidud painde-, tõmbe- ja survekatse käigud ning analüüsitakse tulemusi.

## 2. 3D PRINTIMINE

3D printimine on protsess, mille käigus digitaalse mudeli põhjal tehakse kolmemõõtmeline objekt. Kolmemõõtmeline ese luuakse, printides õhukesed materjalikihid 3D mudeli järgi. Iga kiht on oma olemuselt prinditava eseme läbilõige. 3D printimise abil saab toota keerukaid kujusid, kasutades väiksemat kogust materjali kui traditsioonilise tootmise puhul.



Joonis 2.1. 3D printimise etapid

Kolmemõõtmelist printimist kasutatakse väga paljudes elu- ja tööstusharudes ning selle all hõlmatakse mitmeid erinevaid tehnoloogiaid ja materjale. Tänapäeval kasutatakse 3D trükkimist prillide, jalanõude, mööbli, rekvisiitide, toodete prototüüpide ja makettide loomisel ning erinevate artefaktide koopiade ja rekonstruktsioonide tekitamisel. Samuti on 3D printimine leidnud kasutust proteeside tegemisel hambaravis ja ka kehaosade ning organite proteesimisel.

Ettevõtted kasutavad 3D printimist niinimetatud „kiire prototüüpimise“ jaoks [1]. See tähendab, et idee muutub 3D mudeliks ja seejärel füüsiliseks objektiks kiiremini ja odavamalt, et tekitada toote prototüüp reklaamiks ja müügiks.

### 2.1. 3D printimise ajalugu

3D printimine ulatub palju kaugemale ajalukku, kui arvatakse. 19ndal sajandil mainitakse esimesi katsetusi luua kolmemõõtmelisi topograafilisi kaarte kihtide tekitamise abil [2].

Aastal 1983, leiutas Chuck Hull stereolitograafia (SLA), mis on esimene 3D loomise tehnoloogia. Seejärel töötati välja laserpaagutamine (SLS) ja ka esimene FDM ehk sulatatud sadestumise vormimise printer. [2]

Pärast seda toimus kiire 3D printimise tehnoloogia areng. Juba 1999. aastal prinditi esimene organ, milleks oli põis. Aastal 2006 tuli müügile esimene SLS printer massidele ja seejärel hakkas 3D printimise tehnoloogia muutuma aina taskukohasemaks ja kergemini kättesaadavaks ning 3D printimise areng meditsiinis toimus väga kiiresti.

## **2.2. 3D printimistehnoloogiad**

3D printimisel kasutatavate materjalide ja tehnikate arvukusest tulevad ka mitmed erinevad 3D printimise viisid [3]. Kolmemõõtmelise printimise jaoks kasutatavate materjalide seas on plast, keraamika, vaik, metall, liiv, tekstiil, orgaanika, klaas ja kuutolm.

### **2.2.1. Sulatatud sadestumise modelleerimine**

FDM on teiste 3D printimise tehnoloogiatega võrreldes kõige taskukohasem ning seda kasutavad üksikisikud isiklike printeritega [3]. FDM protsessi käigus materjal sulatatakse ja surutakse düüsi kaudu välja. Objekt prinditakse kiht kihi haaval tekitades objekti õhukesi ristlõikeid.

FDM tehnoloogiat tuntakse ka FFF nime all. Nende kahe ainuke erinevus seisneb selles, FDM on registreeritud kaubamärgina Stratasys Inc. poolt ning FFF ei ole seotud mingi kaubamärgiga. [4]

### **2.2.2. Laserpaagutamine**

Laserpaagutamise puhul kasutatakse laserit, mis sulatab printimiseks kasutatava materjali pulbri kihthaaval vastavalt objekti ristlõikele. [3]

### **2.2.3. Stereolitograafia**

SLA tehnoloogia kasutab printimise materjalidena fotopolümeervaiku, mis tahkestub valguse toimel. Enamus printereid kasutavad vedelate materjalide tahkestamiseks ultravioletset valgust. Objekt prinditakse samuti ühe ristlõike kihi kaupa. [3]

### **2.2.4. Digitaalne valgustöötlus**

Digitaalne valgustöötlus sarnaneb SLA tehnoloogiaga. Erinevus seisneb selles, et fotopolümeervaik tahkub tavalise valguse abil, mitte ultraviolettlaseri abil. [3]

### **2.2.5. Pidev vedelate liideste tootmine**

CLIP tehnoloogia on kõige kiirem 3D printimise tehnoloogiatega. Printimiseks kasutatakse vedelat vaiku, mida töödeldakse valguse ja hapniku koguse reguleerimise abil. Antud tehnoloogia kiirus seisneb selles, et prinditavat eset võib kasvatada vaigust pidevalt, ilma ootamata, et kihid kuivaks. Valgus kiirendab vaigu tahkestumist ja hapnik vastupidi peatab. [5]

### **2.2.6. Lamineeritud objekti valmistamine**

LOM tehnoloogia kasutab õhukesi paberi, plastiku- või metallikihte. Iga järjestikune kiht asetatakse tööpinnale ja laser lõikab kihi vastavalt mudeli ristlõikele, seejärel prinditav mudel liigub ühe kihi paksuse võrra allapoole ja selle peale asetatakse uus leht materjali ning protsess jätkub kuni objekti valmimiseni. [6]

### **2.2.7. Mitme joaga modelleerimine**

MJM tehnoloogia puhul väljub materjal printerist aluspinnale paljude väikeste avade kaudu. Materjal, mis on sarnane SLA-tehnoloogias kasutatavale fotopolümeerivaigule, tahkestub samuti töötlemisel UV-kiirtega.[6]

### **2.2.8. Elektronkiirsulatus**

Elektronkiirsulatus jaoks kasutatakse metallisulami puru või pulbrit, mida sulatatakse 3D mudeli järgi õigeks kujuks elektroonkiirtega. EBM tehnoloogia on leidnud kõige rohkem kasutust proteeside valmistamisel, kuna see lubab kasutada titaani sulameid, millest valmivad erakordselt vastupidavad detailid.[6]

### **3. BETOONIGA 3D PRINTIMISE MÕISTED JA PÕHIMÕTTED**

Traditsiooniliselt on ehitus tuginenud kahemõõtmelistele joonistele, plaanidele ja vaadetele ning tänapäeval on juba tavapärase, et ehitusprojektide koosseisus on ka kolmemõõtmelised mudelid virtuaalses keskkonnas BIM (building information modeling). Digitaalsete mudelite lisamine ehitusse on andnud arhitektidele, disaineritele ja inseneridele võimaluse teha koostööd ning visualiseerida ideid ja muudatusi kergemini. [7]

Betoon on olnud üks kõige enam kasutatud materjale maailmas juba aastakümneid. Tänapäeval leiab tavaline betoon asendust 3D prinditava betooni näol. Aina rohkem katsetatakse 3D trükitava betooni kasutamisega erinevates valdkondades. Kuigi tundub, et betooni robustne olemus ei käi kokki printimise peene tehnoloogiaga, on 3D prinditud betoonil mitmed eelised, mis teevad selle materjali ahvatlevaks. [8]

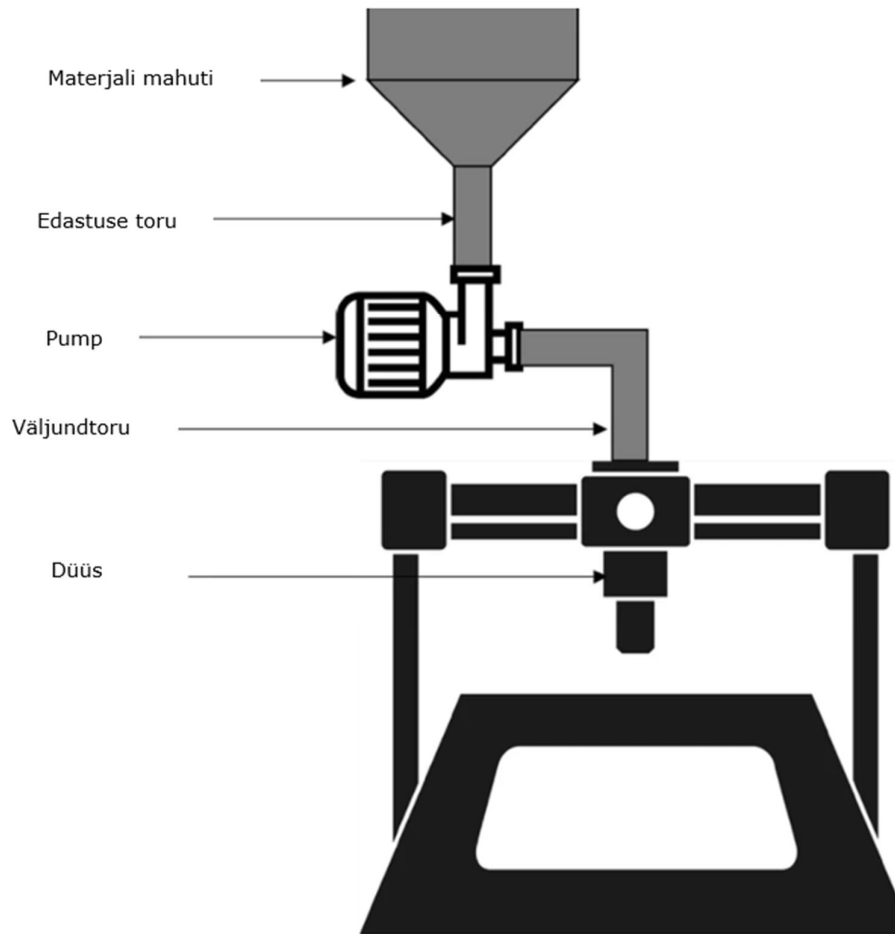
3D printimine ehk kihtlisandustehnoloogia on kindel osa digitaalsest tootmisest. Viimaste aastate jooksul on leitud, et 3D printimise tehnoloogial on palju potentsiaali ehitussektoris. Peamised eelised on ehitise valmimisaja märkimisväärne lühenemine, ehitusjätmete vähenemine ning inimjõu vajaduse vähenemine, millega kaasneb ka riski vähenemine. [7]

#### **3.1. Betooniga 3D printimise protsess**

Betoonist 3D printimise etapid on samad, nagu tavalise kolmemõõtmelise printimise puhul, mis on kirjeldatud eelpool. Protsess algab prinditava projekti ettevalmistamisega, seejärel valmistatakse materjal ning lõpuks prinditakse ese valmis. [9]

Projekti ettevalmistamise etapis disainitakse soovitud eseme või konstruktsiooni kolmemõõtmeline mudel CAD programmis ja seejärel konverteeritakse 3D printeri jaoks vajalikku formaati. Sellest failist luuakse printimise rada ehk materjali ladustamise rada. [9]

Järgmises etapis segatakse kokku betoonisegu printimise jaoks. Segu paigutatakse mahutisse, kust seda juhitakse printimisalusele torude kaudu. Segu saab valmistada tsükliliselt, ehk lisades segu mahutisse kindla koguse kaupa või pidevalt, ehk segu toodetakse ja suunatakse mahutisse automatiseeritult. [9]



Joonis 3.1. Betooni 3D printeri skeem [9]

Betooniga printimiseks on kaks peamist võimalust: ekstrudeerimine pöörleva kruvi või rammimise ehk surumise abil. Enamasti eelistatakse ehituses kruviga düüsi kasutust ning rammimist eelistatakse aga pigem laborites, et uurida üksikute segude omadusi. [10]

Rammiga ekstrudeerimise puhul ei saa printida jätkuvalt üle pika ajaperioodi, kuna mahutisse ei saa segu pidevalt lisada, erinevalt kruviga pumbast. Surumise abil ekstrudeerimise puhul surub materjali mahuti sees paigutatud ramm segu välja läbi toru. Sellise tehnoloogia puhul ei pea segu olema nii voolav, nagu spiraalse pumbaga tehnoloogia puhul. Segul peab olema suurema viskoossusega, et hoida oma kuju pärast printimist. Kruvipumba puhul liigub segu jätkuvalt edastuse voolikusse, kus spiraalselt pöörlev pump võtab segu sisse ning lükkab selle edasi ja välja läbi väljundtoru ja düüsi. [10]

### 3.2. 3D prinditud betooni omadused

Kolmemõõtmelise printimise jaoks kasutatakse erilist betooni, mida saab kasutada ainult 3D printimise tehnoloogiaga [11]. Võrreldes traditsioonilise betooniga ei vaja 3D betoon konstruktsiooni püstitamiseks raketiste ehitamist, armeerimist ega betooni vibreerimist [11]. Ehitusliku betooni printimisel võib tekkida olukord, kus armeerimine on vajalik konstruktsiooni tugevdamiseks. Sellisel juhul on vajalik tehnoloogiline lahendus, mis saab lisada armatuuri konstruktsiooni printimisega samaaegselt [7].

3D prinditud betoon ühendab torkreeta-meetodil pinnale kantava betooni ja isetiheneva betooni omadusi. [11] Torkreteerimine on betoonimise viis, mille puhul segu kantakse pinnale voolikust surveõhu abil õhukeste kihtide kaupa. Torkreeta-meetodit kasutatakse erinevate ebatasaste pinnaste puhul armeeritud vahelagede, teraskonstruktsioonide betoneerimiseks ning vanade ehitusdefektide kõrvaldamiseks. [12]

Isetihenev betoon on voolav ja saab omaraskuse abil tiheneda ja täita iga kuju ja mõõtmega ruumi. Isetihenevat betooni ei ole vaja täiendavalt tihendada, ehk see võimaldab valmistada keerukaid konstruktsioonide, mille puhul tihendamine on raskendatud või isegi võimatu. [13]

Järelikult peab kolmemõõtmelise printimise jaoks materjal olema piisavalt tugev, et hoida igat uut prinditavat kihti deformeerimata alumisi kihte. Samaaegselt peab materjal olema voolikust väljasurutav ja heade kuju säilitamise omadustega. Kuna võrreldes tavapärase betooniga, ei vaja 3D prinditud konstruktsioonid raketiste püstitamist, määrab prinditava elemendi kuju materjali reoloogia ja värske materjali omadused. [7]

Uuringus [7] pakuti välja omadused, mille põhjal kontrollida 3D prinditava betooni sobivust kasutamiseks ehk omadused, millest kujuneks välja materjali valmistamise standard. Ekstrudeeritavus, voolavus, üles ehitatavus, kihi kleepuvus ja kasutatavusaeg [7]. Tavalise betooni puhul viitab kasutatavusaeg ajavahemikule, mille jooksul betoon on veel manipuleeritav, ega ole piisavalt kuivanud [14]. 3D prinditud betooni puhul tähendab see ajavahemikku, mille jooksul betoon peab olema pumbatud ja ekstrudeeritud, et tagada õige viskoossus ja voolavus [14]. Samuti pakuti, et tsementse materjali tiksotroopiline omadus on väga kasulik tänu suurele tugevusele ja madalale viskoossusele [7]. Tiksotroopia on materjali omadus muuta oma viskoossust mehaanilise mõjutuse tulemusena ning mõju lakkamisel esialgne viskoossus taastub [11]



### 3.3. 3D prinditud betooni potentsiaal

3D prinditud betooni kasutamise kasvuga ehituses ja konstruktsioonides on kaasnenud kiire tehnoloogia areng ja on selgunud mitmed tehnoloogia kasutuselevõtuga kaasnevad eelised. Võrreldes traditsiooniliste ehitamismeetoditega valmib konstruktsioon kiiremini, on vähendatud inimjõu vajadus ja ehitusjäätmete hulk, samuti on võimalik rahaline kokkuhoid transpordi juures. [7]

Peamine eelis, mis tuleb kaasa 3D printimise tehnoloogia kasutamisega on disaini vabadus. Arhitektid ja projekterid saavad luua konstruktsioone peaaegu täiesti vabalt [7]. Printides objektile kohapeal või pannes konstruktsioon eelprinditud elementidest kokku, saab pakkuda robustsema disainiga hooneid [7]. Betooni printimisega on võimalik saavutada vastupidi ka väga väikeseid, hernetera suurusi detaile, ümaraid, õõnsaid ja kumeraid detaile. [8]

Teine eelis on ehitusprotsessi madal maksumus. 3D prinditud ehitise maksumus on väiksem traditsioonilise ehitisega võrreldes, sest see ei vaja raketisi ja vähem inimesi objektile töötamas. Samuti ehitamiseks vajalik materjal laotakse koheselt vajalikku kohta, mis omakorda elimineerib suure koguse ehitusjätmeid platsil. [7]

Kolmas tähtis 3D printimise eelis on võimalus püstitada konstruktsioone raskesti ligipääsetavates asukohtades. 3D printimine ei vaja pidevat inimeste kohalolekut, vaid ainult printerit ja piisavalt materjali, et töötada pausideta minimaalse järelevalvega. Seetõttu on see parim variant ehitamiseks piirkondades, mis on potentsiaalselt ohtlikud inimeste jaoks. Tulevikus leiab 3D printimise tehnoloogia kasutust majade ehitamisel Kuul või Marsil. [15]

Neljandaks eeliseks on printeri suutelisus paigutada betooni ainult nendesse kohtadesse, kus see on konstruktiivselt tähtis. Traditsiooniliselt valatakse betoonist terviklikud elemendid kasutades rohkem betooni kui tegelikult vaja konstruktsiooni tugevuse tagamiseks. Betooni tootmisega kaasneb aga suure koguse süsihappegaasi eraldumine. Ehk 3D prinditava betooni kasutamisega saab vähendada ka eralduva süsihappegaasi kogust, kuna toodetava ja vajamineva betooni kogus on väiksem. [8]

Viimaseks eeliseks on võimalus integreerida ühte konstruktsiooni erinevat tüüpi, värvi ja kvaliteeti betooni. See tähendab, et üks sein võib sisaldada korraga kõiki omadusi, mis on vajalikud antud situatsioonis. Selline sein võib olla tugevdatud traadi kiududega, mis samaaegselt soojustavad seina. Välimine kiht saab olla mustust eemale tõukava omadustega betoonist ja sisemine kiht saab tagada soovitud akustilisi omadusi. Lisaks saab selline sein sisaldada juba vee äravoolu torusid veekindlast betoonist. See teeb ehitamise protsessi kiiremaks. [8]

### **3.4. 3D prinditud betooni kasutamise raskused ja väljakutsed**

Vaatamata 3D prinditud betooni suurele potentsiaalile on prinditud konstruktsioonid silmitsi mitme väljakutsega, mida tuleb käsitleda selle tehnoloogia edukaks rakendamiseks ehituses. [7]

#### **3.4.1. Betooni nõuded 3D printimise jaoks**

Tavapärasest betooni ei saa kasutada 3D printimise jaoks, see tehnoloogia vajab erilist betooni. Selline betoon peab olema piisavalt tihe, et hoida oma kuju ilma alumisi kihte deformeerimata, aga samas peab olema voolav, et tulla ühtlaselt voolikust välja. Tänapäeval on peamiseks probleemiks täpsete proportsioonide puudumine vajaliku betoonisegu jaoks. [7]

#### **3.4.2. Struktuuri terviklikkus ja anisotroopsed omadused**

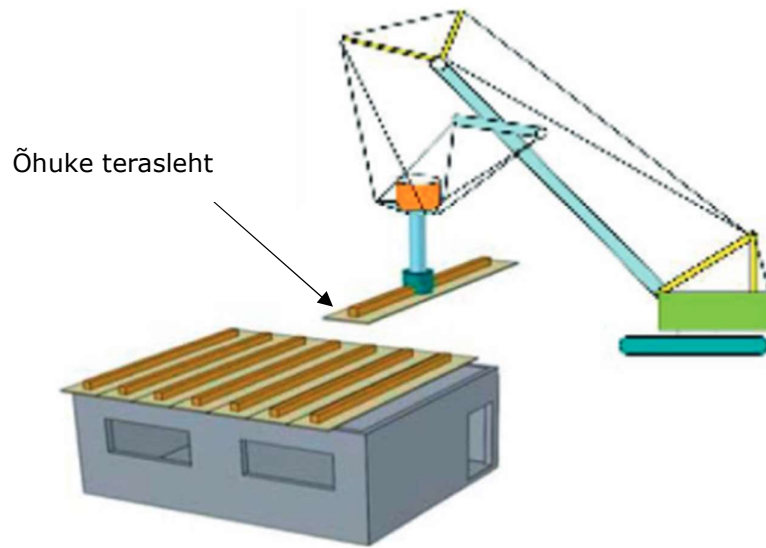
Võivad tekkida olukorrad, kus kohapeal ei ole konstruktsiooni printimine võimalik ning terve konstruktsiooni kohale transportimine on võimatu selle gabariitide tõttu. Sellisel juhul peab konstruktsiooni printima sektsioonide kaupa ja transportima kohale ja kokku panema. Mitme osa ühendamisel peab olema ettevaatlik ja jälgima konstruktsiooni terviklikkust, kuna temperatuuri muutuste või transportimise vibratsiooni tõttu võib esineda mahukahanemist ja tugevuse kahanemist. Side betooni kihtide vahel peab olema piisavalt tugev, et transportida konstruktsiooni osa ilma seda kahjustamata. [7]

#### **3.4.3. Järeltöötlemine**

Valmis konstruktsiooni pinna viimistlus on üks betooni 3D printimise tehnoloogia negatiivseid külgi. Liigne materjali kuhjumine võib tuua kaasa konstruktsiooni pinna kvaliteedi vähenemise. Vastupidiselt liiga vähese materjali kasutamine toob kaasa tühimike tekkimise konstruktsiooni, mis omakorda põhjustab konstruktsiooni tugevuse kahanemist. Järelikult konstruktsiooni pinna kvaliteedi ning mõõtmete täpsuse tagamiseks peab 3D printimise puhul toimuma kvaliteedikontroll nii printimise käigus, kui ka pärast. [7]

#### **3.4.4. Horisontaalsete konstruktsioonide printimine**

Horisontaalsete põrandate ja vahelagede kolmemõõtmeline printimine betonist on eriti suur väljakutse. Üks võimalus on kinnitada õhukesed teraslehed juba prinditud talade külge. Seejärel talad koos teraslehtedega saab tõsta õige koha peale ning lõpuks printida 3D printeriga talade peale (Joonis 3.2). [16]



Joonis 3.2. Horisontaalse konstruktsiooni püstitamine [16]

Šveitsi Föderaalsetes Tehnoloogiainstituudi Arhitektuuri Osakond pakkus välja betoonvahelae lahenduse 3D printeri jaoks [17]. Uudne põrandasüsteem on betoonist plaat paksusega 2 cm, milles armatuur on välja vahetatud õhukeste vertikaalsete ribide vastu (Joonis 3.3). Selline lahendus teeb konstruktsiooni märkimisväärselt kergemaks. Võrreldes klassikaliste betoonpaneelidega on need paneelid disainitud kaarduma, et kanda raskust. Lahendus on inspireeritud võlvkaartega lagedest gooti stiilis katedraalides. Terasega armeerimine ei ole sellisel puhul vajalik, mis hoiab kokku raha ja aega. Samuti kuna selliste paneelide valmistamisel kulub vähem betooni, on sellised põrandad 70% kergemad kui tavalised betoonpaneelid. [16]



Joonis 3.3. Šveitsi Föderaalsete Tehnoloogiainstituudi Arhitektuuri Osakonna kerge betoonpaneel [17]

### **3.4.5. Väljaulatuvate konstruktsioonide printimine**

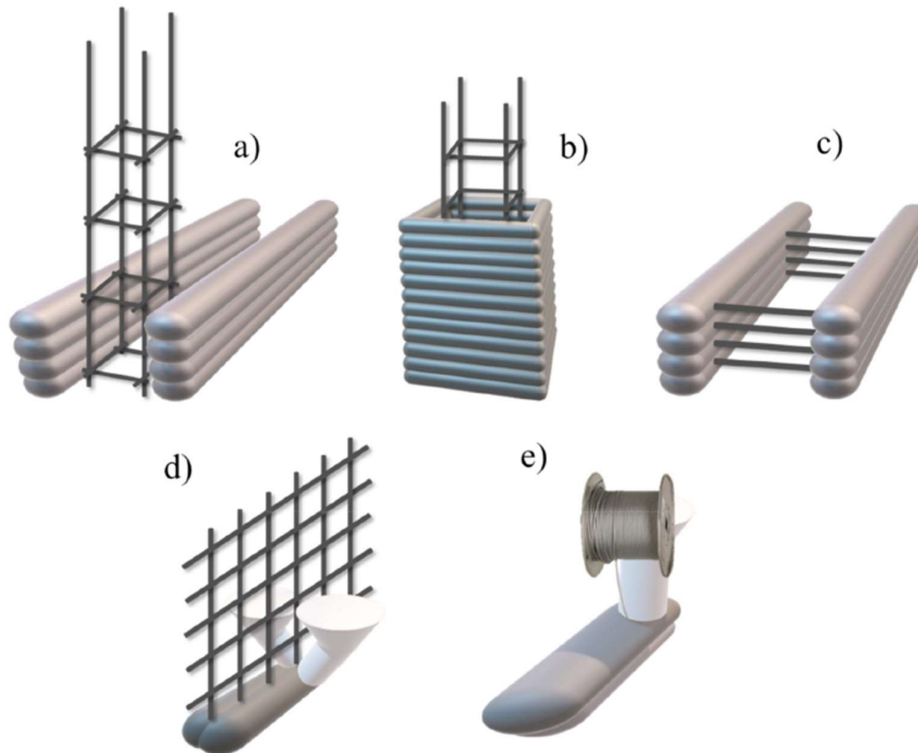
Betooni printimise peamine piirang seisneb selles, et väljaulatuvaid või üle ääre rippuvaid elemente ei ole võimalik printida. See tuleneb sellest, et materjali ekstrudeerimisel on ta liiga pehme ja voolav, et jääda paika seisma koheselt ilma alguses kivistumata. Kivistumist kiirendavate ainete lisamine segule võib aidata välja ulatuvate konstruktsioonide printimisega ilma rikkumata kihtidevahelisi sidemeid. [7]

Kasutades D-shape tehnoloogiat, on võimalik toota keerukate geomeetriliste kujudega konstruktsioone. Lisaks saab kasutada segus kiiresti kivinevaid materjale [7]. D-shape on kolmemõõtmelise printimise tehnoloogia, milles kasutatakse vahelduvaid granuleeritud materjali kihte, näiteks silutud liivakihte. Kihid on tüüpiliselt paksusega 0,1 kuni 4 mm ning pärast iga kihi puistamist printimislavale, printeri düüs liigub selle kohal järgides arvuti poolt määratud teekonda ning injekteerides siduvat vedelikku määratud kohtadesse, mis omakorda tahkestab graanuleid. Kihtide lisamist ja vedeliku injekteerimise tsüklit korratakse kuni objekti valmimiseni. Kuna printimise käigus on struktuur toetatud granuleeritud materjaliga, on võimalik printida üle ääre ulatuvaid konstruktsioone. Lõpus prinditud struktuur võetakse granuleeritud materjali massist välja ning seda saab taaskasutada järgmise objekti printimiseks. [18]

### **3.4.6. 3D prinditud betooni armeerimine**

Tüüpilisel portlandtsemendist tehtud betoonil on suur survetugevus, aga üpris väike tõmbetugevus ning selle parandamiseks kasutatakse betoonkonstruktsioonide valmistamisel armeerimist terasvarrastega. Betooni 3D printimise puhul enamasti ei ole armeerimine vajalik, kuid situatsioonis, kus see on vajalik konstruktsiooni tugevdamiseks, on olemas erinevad võimalused. [19]

Esimene võimalus on printida konstruktsiooni välimised seinad ja paigutada armatuur tornideks kokkuseotuna prinditud kanalisse kas käsitsi või masina abiga ning hiljem täita kanal traditsioonilise valatava betooniga (Joonis 3.4. a-b). Teisena on võimalik pärast iga kihi printimist paigutada üksikud armatuurvardad igasse kihti horisontaalselt, et tugevdada konstruktsiooni (Joonis 3.4. c). Lisaks on võimalik printida kohe paika pandud armatuurvõrgu ümber kasutades spetsiifilist hargnevat düüsi (Joonis 3.4. d). Viimane võimalus on kasutada traati, mis sisestatakse kihi sisse kohe printimise käigus (Joonis 3.4. e). [19]



Joonis 3.4. 3D prinditud konstruktsiooni armeerimise võimalused [22]

### 3.5. 3D PRINDITUD BETOONI PROJEKTID MAAILMAS

3D prinditud betoonist valmistatud hooneid ning muid ehitisi leidub kõige rohkem Araabia Ühendemiraatides. 2016. aastal pakkus šeik Mohammed bin Rashid al.Maktoum välja 3D printimise strateegia, mille kohaselt 2030. aastaks peaks Dubais olevatest hoonetest 25% olema 3D prinditud. [36]

#### 3.5.1. Sillad ja väiksemad konstruktsioonid

2016. aasta lõpus valmis Hispaanias Alcobendas linnas esimene betoonist 3D prinditud jalakäijate sild. Sild on 12 meetrit pikk ja 1,75 meetrit lai ning see pandi kokku kaheksast tükist. Antud silla tootmine oli linna jaoks majanduslikult kasumlik, kuna see valmistati taaskasutatud betoonist. [15]



Joonis 3.5. 3D printitud jalakäijate sild Hispaanias Alcobedas. [37]

Hollandi firma BAM Infra ja Eindhoveni tehnoloogiaülikooli koostöö raames ehitati 2017. aasta suvel esimene betoonist printitud täiesti eelpingestatatud jalakäijate ja jalgratturite sild [37]. See valmistati betoonelementidest, mis toodi kohale ja seejärel konstruktsioon pandi kokku. Sild on 8 meetrit pikk ja on osa uuest ringteest [38]. Selle valmistamiseks kulus vähem materjali kui valatud betoonsilla jaoks ning seetõttu arvatakse et 3D printimine on jätkusuutlikum [37].



Joonis 3.6. Eelpingestatatud jalakäijate ja jalgratturite sild. [37]

2020. aastal valmis Tšehhis esimene ujuv koolmemõõtmeliselt printitud hoone. 43m<sup>2</sup> pindala majas on elutuba, köök, magamistuba ja vannituba. Maja disain oli inspireeritud

üherakulistest algloomadest ning selle printimiseks kulus 32 tundi ja 17t betoonisegu ning seejärel betoon kivistus 28 päeva. Pärast hoone kivistumist ta transporditi Prahasse. [39]



Joonis 3.7. Ujuv 3D prinditud betoonist maja Prahast, Tšehhis. [39]

### 3.5.2. Project Milestone

Project Milestone raames valmivad Hollandi linnas Eindhovenis viis 3D prinditud betoonist hoonet. See on esimene kolmemõõtmelisel printimisel baseeruv eramajade kommertsprojekt. Kõik hooned on projekteeritud tänapäevaste mugavuse nõuete kohaselt ja on mõeldud elamuteks. [40]

Project Milestone nimi tähendab otsetõlkes projekt verstapost, sest seda projekti võib nimetada 3D betooni printimise verstaposti sündmuseks. Projekteeritud majad valmivad keskkonnasäästlikult ja energiatõhusalt ning on mugavad, valgusküllased, vaiksed ja asuvad loodusküllases piirkonnas. [40]

Viis maja ehitatakse teineteise järel, mille puhul iga järgmine on keerulisema printimise tehnoloogia ja disainiga [40]. Esimene maja valmib osadena tehases ja see pannakse kokku ehitusplatsil ning viimane maja valmib juba täiesti kohapeal [40]. Sellisel viisil saab ühes kohas kokkuvõtlikult näidata erinevate tehnoloogiate kasutamise tulemusi [40]. Iga hoone printimisel saab eelmise valmimise jooksul õpitud innovatsioonid rakendada järgmise printimisel [41].

Houben / Van Mierlo arhitektide poolt pakutud majade futuristlik disain on ajatu ning tuleneb uue tehnoloogia võimalustest. 3D printimise tehnoloogia annab vormivabadust erinevalt traditsioonilisest betoonist, mis on oma vormilt jäik. Seda vormivabadust kasutatakse selleks, et luua disain, mis lubab eramutel loomulikult sulada loodusesse,

nagu suured kivid. Disaini kohaselt peaksid eramud välja nägema, nagu nad jäeti ammu maha ja nad on selles keskkonnas alati olnud. [40]

Esimene maja on ühekorruseline kolmetoaline hoone pindalaga 95m<sup>2</sup> ja puidust katusekonstruktsiooniga. Printimisega alustati 2020. aastal ja maja oli valmis sissekolimiseks 2020. aasta keskpaigaks. Ülejäänud neli maja on mitmekorruselised ning kogu konstruktsioon on betoonist prinditud. Kõikidel majadel tuleb tavapärase betoonist valatud vundament. Ülejäänud nelja maja printimisega ei ole veel alustatud. [41]



Joonis 3.8. Project Milestone raames valminud 5 eramut Eindhovenis. [41]



## 4. MAAILMAS LÄBI VIIDUD KATSETE KIRJELDUSED

Traditsioonilised betoonisegud ei sobi kolmemõõtmelise printimise jaoks. Tänapäeval töötatakse selle kallal, et tuvastada ja panna paika parimad saadaval olevad materjalid, mida saab kasutada 3D printimisel. Materjalid peavad olema sobivate mehaaniliste omadustega ja võimalustega, et tagada betooni jätkuvat voolamist ja kihtide järkjärgulist kuhjumist. Enamasti katsetes kasutatakse betoonisegus tsementi, liiva, lendtuhka, mikrosilika (ehk peenräni) ja kiudusid.

### 4.1. Koostise väljatöötamine peamiste 3D prinditava betooni omaduste põhjal

Katse viidi läbi Rahvusliku Tsiviilehituse Ülikooli poolt Vietnami pealinnas Hanois. Selle katse tulemusena saadud betoonisegu pidi vastama värskelt ja kivilinenud tavabetooni nõuetele. Surve- ja paindetugevus on tähtsad mehaanilised omadused nii prinditud kui ka tavabetooni puhul. Eesmärgiks seatakse pärast 28 päeva kestnud kivilinemist saavutada survetugevus 100MPa ja paindetugevus 12MPa. [20]

Katse jaoks segati kokku viis erinevat segu, arvestades, et segu tihedus peab olema 2300 kg/m<sup>3</sup> (Tabel 4.1) Superplastifikaatori, aeglusti, kiirendi ja polüpropüleeni kiudude proportsioonid erinevad igas segus. [20]

Tabel 4.1. Segude koostisosad [20]

Segu number	Liiv (kg/m <sup>3</sup> )	Tsement (kg/m <sup>3</sup> )	Lendtuhk (kg/m <sup>3</sup> )	Mikrosilika (kg/m <sup>3</sup> )	Vesi (kg/m <sup>3</sup> )
Segu 1	1612	376	107	54	150
Segu 2	1485	446	127	64	178
Segu 3	1362	513	147	73	205
Segu 4	1241	579	165	83	232
Segu 5	1123	643	184	92	257

Liiva sisaldus vähenes segudes 5% kaupa, alustades segust 1, kus liiv moodustab 75% ning lõpetades seguga 5, kus liiv moodustab 55% kaalust. Sideaine sisaldus aga suurenes vastavalt 25%-st kuni 45%-ni. Igas segus moodustus sideaine 70% tsemendist, 20% lendtuhast ja 10% mikrosilikast. [20]

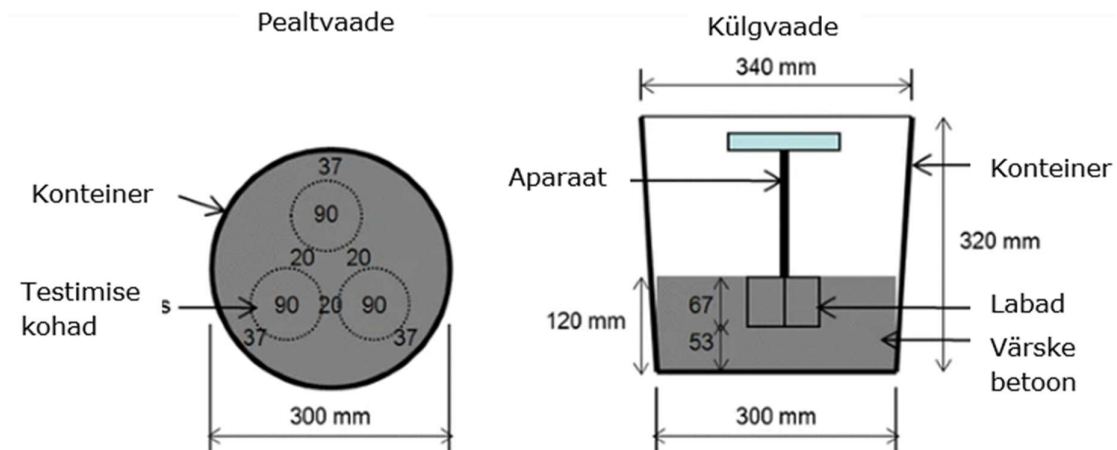
#### 4.1.1. Ekstrudeeritavus

Segudes 1 ja 2 oli suurem kogus liiva ning selle tagajärjena printimise protsessis toimus liiva eraldumise segust, mis omakorda vähendas ekstrudeeritavuse. Voolavuse parandamiseks lisati segusse polükarboksüülaadil baseeruvat plastifikaatorit ja vett. Kuid ekstrudeerimine oli ikka kehv ning liiv eraldus segust ja voolikud ummistusid. See tähendab, et sobiva ekstrudeeritavuse tagamiseks ei ole sideaine sisaldus vahemikus 25-30% piisav. [20]

Segud 3 ja 4 läbisid printeri probleemideta. Seguga 4 oli võimalik printida kiudude sisaldusega kuni  $1,6 \text{ kg/m}^3$  ning seguga 3 oli võimalik printida ainult kiudude sisaldusega kuni  $0,4 \text{ kg/m}^3$ . Suurema kiudude sisaldusega ummistus printimiseks kasutatud 9 mm diameetriga düüs. Kiudude tarnija poolt soovitatud kiudude sisaldus oli  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Segu 4 läbis düüsi sellest suurema kiudude sisaldusega ning seetõttu valiti ta optimaalseks seguks. Seguga 5 ei viidud katset läbi ning edasi töötati ainult seguga number 4. [20]

#### 4.1.2. Töödeldavus

Töödeldavuse katsetamiseks kasutati reomeetrit, mida originaalselt kasutatakse mulla nidususe mõõtmiseks. Iga segu asetati konteinerisse ja aparaat segas seda kolmes punktis pöörlevate labadega, mille läbimõõt on 90 mm. Segamise kiiruseks on  $6^\circ$  kuni  $12^\circ$  minutis. [20]

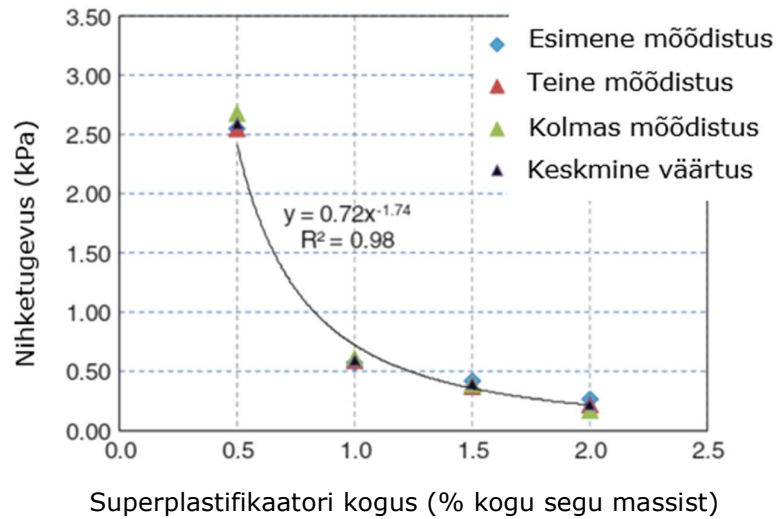


Joonis 4.1. Nidususe mõõtmise aparaadi skeem [20]

Töödeldavust mõjutasid peamiselt protsessi kiirendavad ja aeglustavad lisandid ja superplastifikaatorid. Katses kasutati aeglustit, mis koosnes metüleenfosfoonhappest, sidrunhappest ja formaldehüüdist ning kiirendit, mis koosnes väävelhappe soolast, alumiiniumsoolast ja dietanoolamiinist. Alguses katsetati segu tugevuse muutumist ainult superplastifikaatorite koguse muutmisega. Katsetati segusid, kus superplastifikaatorite kogust muudeti vahemikus 0% kuni 2%, mis omakorda suurendas betooni tööeldavust.

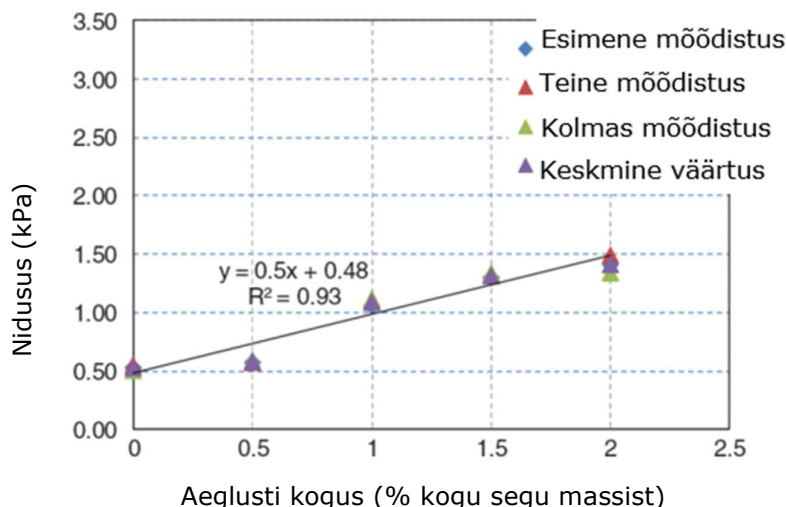
Iga superplastifikaatori koguse juures mõõdeti nidusust aparaadiga kolm korda, ja arvutati välja kolme mõõdistuse keskmine väärtus. [20]

„Kõige märgatavam muutus toimus 0,5% ja 1,0% superplastifikaatori koguse vahemikus (Graafik 4.1), kus nidusus vähenes 2,6 kPa-lt kuni 0,55 kPa.“ [20] Segu 4, mille mahust oli 0,5% superplastifikaator, oli liiga jäik. Superplastifikaatori sisaldusega 1,5-2% esines betooni pumpamisel märkimisväärne konstruktsiooni deformeerumine. Aeglusti ja kiirendi koguse väljaselgitamiseks valiti välja segu 4 superplastifikaatori sisaldusega 1%. [20]

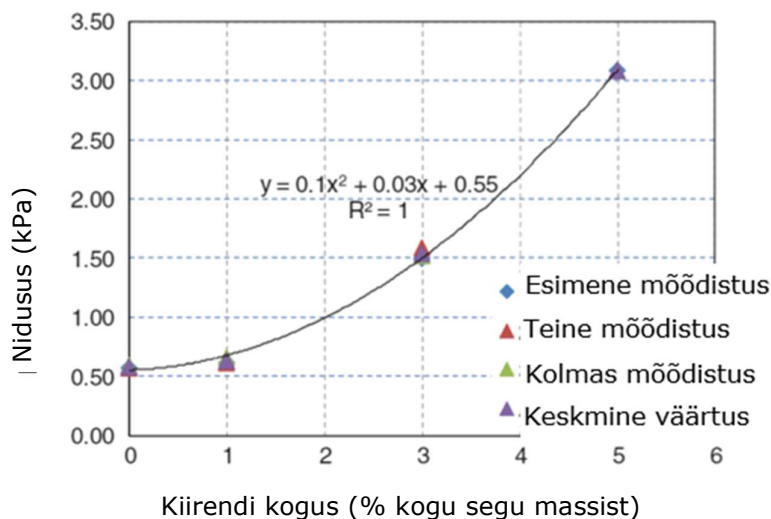


Graafik 4.1. Superplastifikaatori koguse mõju nidususele [20]

„Erinevalt superplastifikaatori koguse mõjust, aeglusti ja kiirendi segusse lisamine vähendas segu töödeldavatust ja suurendas nidusust.“ [20] Aeglusti lisamisega segusse muutus nidusus lineaarselt (Graafik 4.2), aga kiirendi lisamisega oli nidususe muutumine pigem paraboolne (Graafik 4.3). [20]



Graafik 4.2. Aeglusti koguse mõju nidususele [20]



Graafik 4.3. Kiirendi koguse mõju nidususele [20]

#### 4.1.3. Kasutatavusaeg

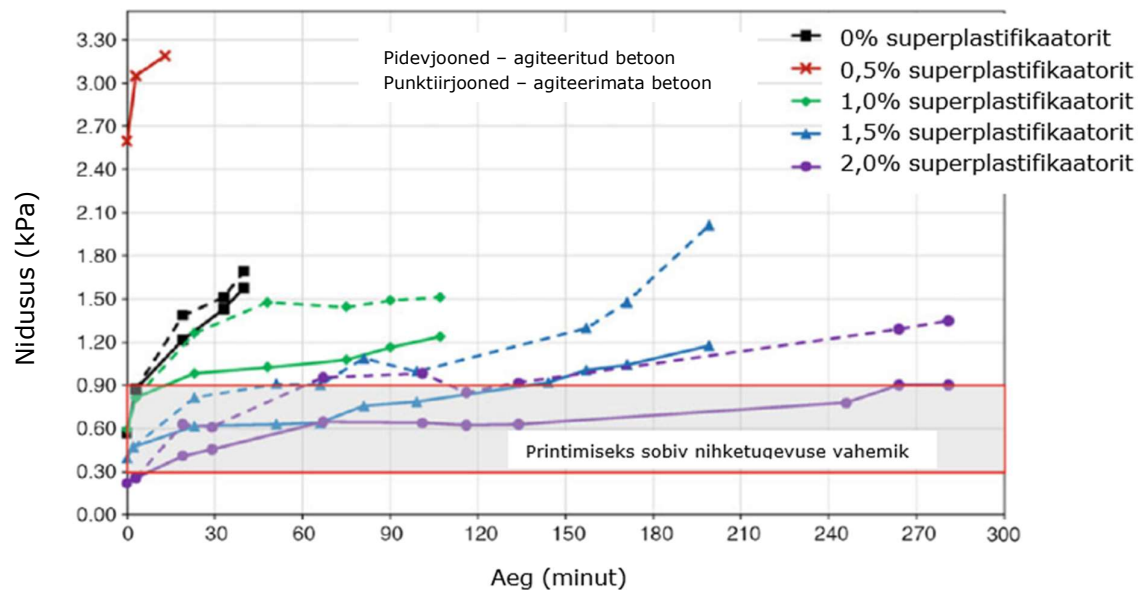
Antud katse osas uuriti printimiseks vajaliku kasutatavusaega ehk „open time“, mis viitab ajavahemikule, mille jooksul värsket betooni on võimalik edukalt pumbata läbi printeri. Kasutatavusaja lõpuhetkeks võeti hetk, kui nidusus oli tõusnud 0,3 kPa võrra algsest nidususest. [20]

Eelkatsed näitasid, et üldiselt värsket betooni proovidel oli suurem nidusus, kui neid ei agiteeritud enne printimist, sellepärast jaotati katse kahte ossa. Alguses uuriti kasutatavusaja vahemikku erinevate superplastifikaatori kogustega ilma aeglustita. Seejärel uuriti segu, mis valiti eelmise katse põhjal sobivaimaks ehk 1%

superplastifikaatori mahuga ning muutuva aeglusti kogusega. Graafikul 4.6. esitatud katse tulemustest on näha superplastifikaatori koguse suurendamise mõju ajavahemikule, mille jooksul prinditavat betooni saab ekstrudeerida. Antud osas katsetati katsekehi kaks korda: agiteerimata ja agiteeritud seisukorras. Esimesena katsetati agiteerimata katsekehi ning seejärel katsekehi, mida raputati 10 korda. [20]

Agiteerimata betoon on esitatud punktiirjoonega (Graafik 4.4) ning selle kasutatavusaeg oli väga lühike. 0,5% superplastifikaatoriga segu esialgne nidusus oli 2,6 kPa, aga kasutamiseks kõlblikkuse ajavahemik oli ainult 3 minutit. Pärast 13 minutit ületas proovi nidusus katsemasina võimsuse, milleks oli 3,2 kPa ning nidusust ei saanud edasi mõõta. 1% superplastifikaatoriga segu proovi ekstrudeeritavuse ajavahemik oli ainult 5 minutit ning tõstes superplastifikaatori koguse kuni 1,5% ja 2,0% pikendas aega vastavalt 15 minuti ja 18 minutini. [20]

Agiteeritud proovid on esitatud pidevjoontega (Graafik 4.4) ja nendel oli pikem ekstrudeerimise ajavahemik. Segu proovil, mis sisaldab 1% superplastifikaatorit, kulus 15 minutit, et nidusus tõuseks 0,3 kPa võrra. 1,5-2,0% superplastifikaatori sisaldusega segudel kulus nidususe tõstmiseks 0,3 kPa võrra üle 60 minuti. Kuid suure superplastifikaatori koguse kasutamise tagajärjena, pumbatav betoon deformeerus ja ei kõlvanud elementide printimiseks. [20]

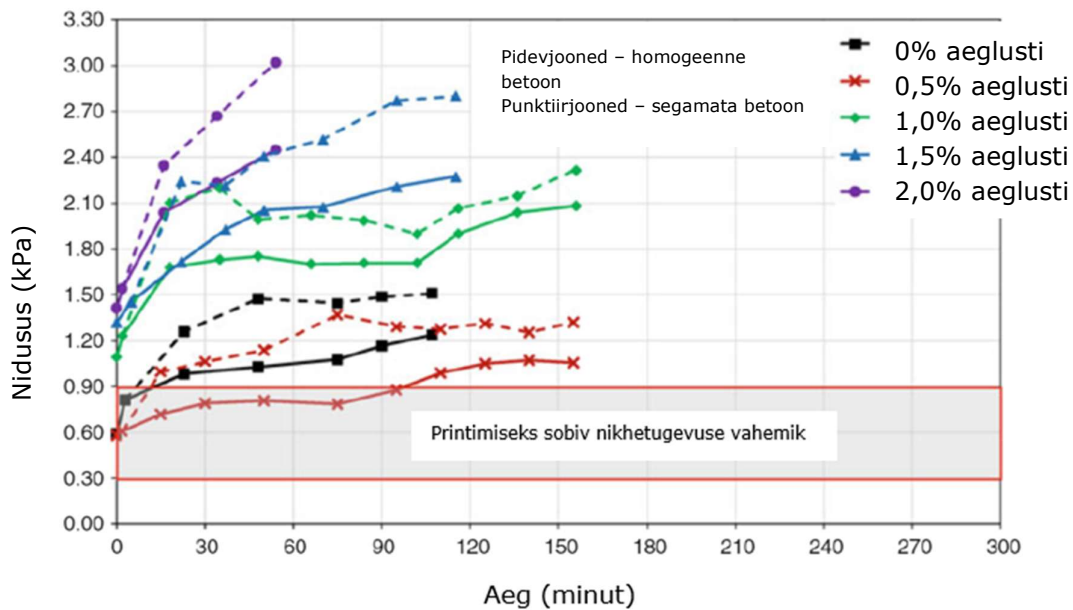


Graafik 4.4. Superplastifikaatori koguse mõju nidususele [20]

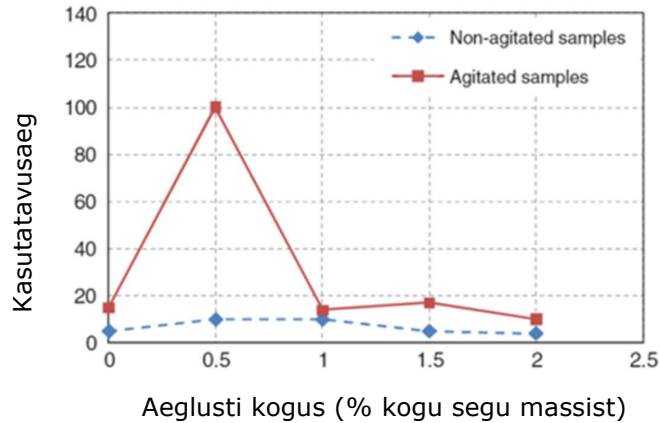
Graafikud 4.5 ja 4.6 näitavad aeglusti lisamise mõju ekstrudeeritavuse ajavahemikule. Kõikides segudes kasutati 1% superplastifikaatorit ning aeglusti maht suurendati nullist kuni 2% sideaine mahust. [20]

Agiteerimata proovide puhul aeglusti lisamine ei mõjutanud ekstrudeeritavuse ajavahemikku märkimisväärselt. Vähem kui 10 minuti pärast suurenes kõigi betooni proovide nidusus rohkem kui 0,3 kPa. [20]

Agiteeritud betooni puhul juba 0,5% aeglusti koguse puhul pikenes ekstrudeeritavuse ajavahemik 100 minutini. Kuid sellest suurema aeglusti koguse kasutamine vastupidi vähendas ekstrudeeritavuse ajavahemikku (Graafik 4.6). 1% aeglusti puhul suurenes nidusus 0,3 kPa võrra 14 minuti jooksul ning järgmise 90 minuti jooksul suurenes väga aeglaselt veel 0,3 kPa võrra. Katses järelalus, et aeglusti ei parandanud ekstrudeeritavuse ajavahemikku segudes, mis olid algusest peale halva töödeldavuse ehk suure nidususega. Segudest, milles sisaldus 1,0-2,0% aeglustit, valmistatud katsekehade survetugevus esimesel kivinemise päeval langes alla 1 MPa ning 0,5% aeglustiga segu survetugevus püsis kuni 20 MPa. Seepärast valiti ekstrudeeritavuse ajavahemiku optimeerimiseks 0,5% aeglustit ja 1% superplastifikaatorit. [20]



Graafik 4.5. Aeglusti koguse mõju nidususele [20]



Graafik 4.6. Aeglusti koguse mõju kasutatavusajale [20]

#### 4.1.4. Ülesehitatavus

Kõikide eelmiste katse osade tulemusena saadud optimaalset segu katsetati lisaks erinevate superplastifikaatorite kogustega, mis muutis värskete segude nidusust veelgi. Värske betooni ülesehitatavuse sobivus määrati edukalt prinditud kihtide arvu põhjal. Edukalt prinditud kihtideks loeti betooni kihte, mis ei pragunenud ega deformeerinud alumisi kihte. Printimist teostati erinevate betoonijugade arvuga. Antud katse tulemusena jõuti järeldusele, et printimiseks sobiva betoonisegu saamiseks, peab tema nidususe olema vahemikus 0,3 kPa kuni 0,9 kPa. [20]

Seguga nidususega 0,3 kPa prinditi ühe kihi paksune sein edukalt ainult nelja kihi kõrguseks ning viie kihiga sein seitsme kihi kõrguseks, kuid kõik prinditud katsekehad olid oluliselt deformeerinud. Nidususe 0,9 kPa puhul vaevu prinditi kaks kihti ja seejärel ilmnesid betoonis praod. Sobivaimaks nidususeks osutus 0,55 kPa, kuna selle seguga prinditi edukalt ühekihiline sein 15 kihi kõrguseks ja viiekihiline sein 34 kihi kõrguseks. (Joonis 4.2). Kahe, kolme ja nelja kihi paksused seinad prinditi edukalt vastavalt 57, 60 ja 61 kihi kõrgusteks. [20]



Joonis 4.2. 3D prinditava betooni ülesehitatavus nidususel 0,55 kPa [20]

#### **4.1.5. Kokkuvõte**

Kõikide läbiviidud katsete tulemuste põhjal jõuti välja 3D prinditava betooni segu optimaalse koostiseni. Katse tulemusena pandi paika, et segu optimaalne liiva ja sideaine vahekord peab olema 3:2, milles sideaine koosneb 70% tsemendist, 20% lehdtuhast, 10% mikrosilikast ja  $1,2 \text{ kg/m}^3$  polüpropüleenkiududest pikkusega 12mm ja läbimõõduga 0,18 mm. Segu optimaalseks vee ja sideaine vahekorraks leiti 0,26 ning sellele lisaks sideaine kogusest 1% superplastifikaatorit ja 0,5% aeglustajat. [20]

Antud segu prinditi düüsiga läbimõõduga 9 mm ning edukalt prinditi järjest 61 kihti ilma alumiste kihtide deformeerumiseta. Ekstrudeeritavuse ajavahemik antud segu puhul oli 100 minutit. Segu survetugevust katsetati valades antud segust kuubid ääre pikkusega 100 mm, mille survetugevust mõõdeti 1, 7, 28 ja 56 päeva pärast kivistumist rakendades kuupidele survejõudu kuni nende purunemiseni. Kuupide survetugevus oli vastavalt 20, 80, 110 ja 125 MPa. Ehk 28. päevaks ületasid kuubid katsetele seatud eeldused. [20]



## 4.2. 3D printitud betooni ja tavabetooni survetugevuste võrdlus

Nanyangi Tehnoloogiaülikoolis Singapuris läbi viidud katses [7] katsetati betoonist 3D printitud katsekehade mehaanilisi omadusi koormates katsekehi erinevatest suundadest ning võrreldes sama tüüpi klassikalisest betoonist valmistatud katsekehadega.

Katses kasutatud segu on lendtuhal põhinev geopolümeer, mis pidi näitama tiksotroopilisi omadusi. Geopolümeerid on anorgaanilised mineraalsed ühendid, mida saab kasutada betooni koostises portlandtsemendi asemel. Antud katses kasutati geopolümeeri, mille koostises (Tabel 4.2) on F-klassi lendtuhk, mis tähendab, et tuhk on tekkinud antratsiidi ja bituminoosse söe põlemisest ning vajab tsementeerumiseks aktivaatorit ja vett [21]. Koostises on samuti jahvatatud granuleeritud kõrgahjuräbu (GGBS), mis on raua ja terase kõrgahjus valmistamise protsessi kõrvalsaadus. Kõrgel temperatuuril sulanud räbu jahutatakse veega, mis muudab ta klaasisarnasteks graanuliteks, mis omakorda jahvatatakse pulbriks [22]. Peenräni on peen pulber, mis on raudräni sulamise kõrvalsaadus. Peen jõeliiv on madala savilisandite sisaldusega liiv, mida puhastab voolav jõe vesi loomulikult. Peenes jõeliivas on osakesed kuni 2 mm läbimõõduga [23]. Kaaliumsilikaat on anorgaaniline ühend, mis töötab lendtuha aktivaatorina [21]. Samuti on koostises täpsustamata tiksotroopilised lisandid ja vesi.

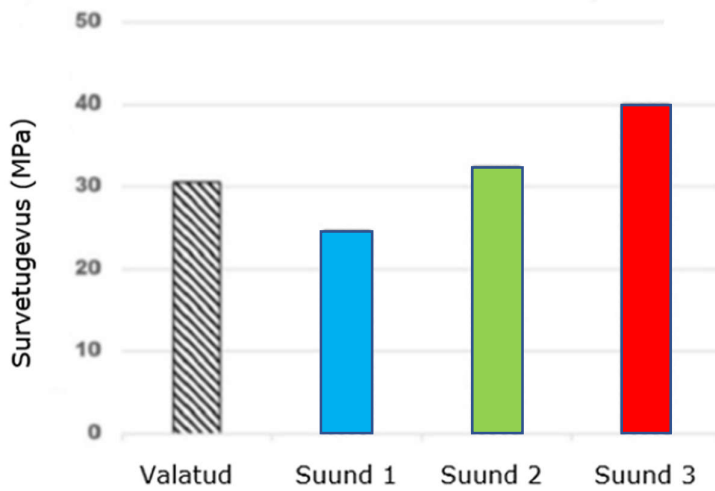
Tabel 4.2. Geopolümeeri koostis [7]

Segu koostisosa	Kaalu protsent (%)
F-klassi lendtuhk	22,42
Räbu (GGBS)	3,27
Mikrosilika (peenräni)	6,54
Peen jõeliiv	49,0
Kaaliumsilikaat (molaarsuhtega 1,8)	13,25
Tiksotroopilised lisandid	0,50

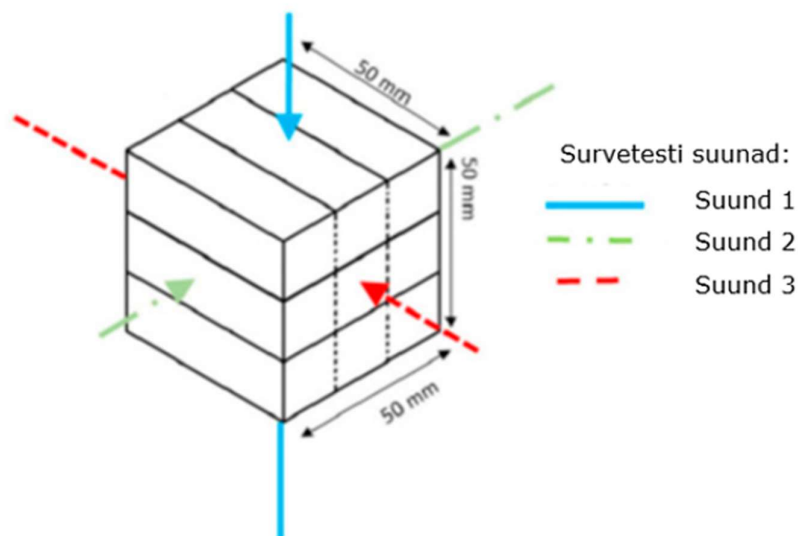
Katset alustati valitud segu tiksotroopiliste omaduste uurimisega, kasutades reomeetrit Viskomat XL, mis näitab betooni segu erinevaid viskoossuse omadusi. Segu asetati konteinerisse, kus masin segas seda jälgides spetsiifilist rütmi. Esimese kahe minuti jooksul tõsteti pöörete arv minutis nullist 60 pöördeni, seejärel kaks minutit hoiti stabiilset kiirust 60 pöoret minutis ning viimase kahe minuti jooksul kiirus vähenes sujuvalt tagasi nullini. Katse käigus mõõtis masin rakendatavat jõudu, mis on vajalik segu konstantseks segamiseks antud kiirusel.

Peale segu ettevalmistamist, paigutati see printerisse ja prinditi 9 kuupi küljepikkusega 50 mm. Samal ajal valati tavalisest betoonist 9 kuupi küljepikkusega 50 mm. Kõik katsekehad kivinesid 28 päeva ning seejärel iga kuubiga viidi läbi survekatse. Nii prinditud kui ka valatud betoonist kuupidest katsetati kolm eri suunas rakendatud survega. [7]

Graafikul 4.8 on esitatud survekatse tulemused. Tavalisest betoonist valatud kuubi survetugevus on ühesugune igast küljest koormates. Graafikul on aga näha, et 3D prinditud katsekehad saavutavad suurema survetugevuse, kui jõud on rakendatud prinditud kihtidega risti ning prinditud kihtide külgedele. Kuid rakendades jõud kihtide printimise tasapinnas, on survetugevus madalam kui klassikalisest betoonist valatud kuubil. [7]



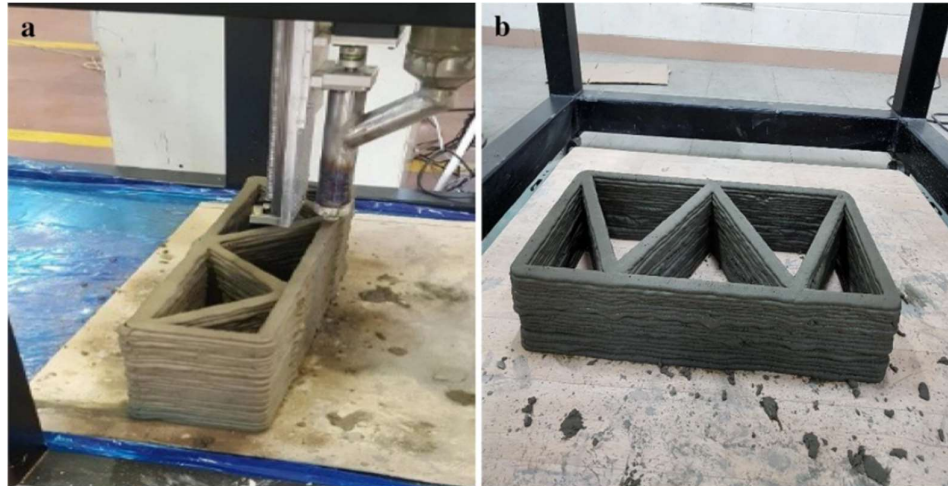
Graafik 4.7. Survekatse tulemused [7]



Joonis 4.3. Erinevad kuubi koormamise suunad [7]

### 4.3. Betoonist 3D printitud õõnesseina koostise väljatöötamise katse kirjeldus

Antud katse viidi läbi Lõuna-Korea Hanyangi Ülikooli Tsiviilehituse ja Keskkonnatehnika Osakonnas koostöös Texase A&M Ülikooli Materjali- ja Inseneriteaduse Osakonnaga. Antud katse peamine eesmärk oli saada teada materjali omadused ja mehaaniline kontrollitavus kihtide printimisel ja kivistumisel. Printitava betooni koostise väljatöötamise protsessis katsetati segu valmistades sellest õõnesseinad mõõtudega 580 x 320mm (Joonis 4.4). [9]



Joonis 4.4. a)Õõnes seina printimine. b)Valmis õõnes sein [9]

Kirjeldatud katset alustatakse optimaalse vee ja CEM I tsemendi vahekorra väljaselgitamisega. See on tähtis optimaalse viskoossuse saavutamiseks, kihtide teineteise peale printimiseks ja pumpamiseks. Seejärel vee ja tsemendi massile lisati kahe erineva terasuurusega ning erinevates vahekorades liiva, et saavutada sobiva konsistentsiga mört. Kasutati liiva terade läbimõõduga alla 0,8 mm ning liiva terade läbimõõduga alla 0,7 mm. Seejärel lisatakse PVA (polüvinüülatsetaat [24]) kiud, et muuta segu ülesehitatavust paremaks. [9]

Samuti iga erinevate proportsioonidega seguga viidi läbi vajumistest, kus kasutati koonust, mille kõrgus on 300 mm, alumine sisemine läbimõõt on 200 mm ja ülemine on 100 mm. Koonus täideti värsket betooni seguga kolmes kihis ja pärast iga kihi täitmist segu tammiti 25 korda. Koonus tõsteti üles vertikaalselt ning koonuse vajumiks on koonuse ja vajunud betooni kõrguse erinevus.

Katses kasutati düüsi läbimõõduga 30mm ja printimisalust, mis vastas printeri liikumise ulatusele, mis on 1m lai, 1 m pikk ja 1 m kõrge. Lõpuks igast segust printitud seinast valiti välja parim ja pandi paika koostisosade vahekorrad. Pärast kõikide katsekehade

valmimist kontrolliti iga seina survetugevust Briti Standardi Instituudi [25] poolt välja töötatud betooni katsetamise standardi BS 1881-116:1983 põhjal [26]. [9]

#### 4.3.1. Vee ja tsemendi vahekord

Antud katse esimene osa keskendus vee ja CEM I tsemendi vahekorra väljaselgitamisele. Katsetamiseks kasutatud segude tsemendi ja vee vahekorrad on välja toodud tabelis 4.3. [9]

Tabel 4.3. Segude tsemendi ja vee vahekorrad [9]

Segu number	CEM I tsement (g)	Vesi (g)	Tsemendi protsent (%)	Vesi/tsement vahekord	Koonuse vajum (mm)
1-1	2000	660	303,03	0,33	220
1-2	4000	1280	312,5	0,32	200
1-3	2000	600	333,33	0,30	190
1-4	2000	580	344,83	0,29	185

Segu 1-1 koonuse vajum oli 220 mm, mis tähendas, et esialgse koonuse ja vajunud betooni kõrguse vahe oli 220 mm ning kihtide järkjärguline printimine ei olnud võimalik, sest mass oli liiga voolav ja ebaühtlane. Vajumi 185 mm saavutanud segu 1-4 oli aga liiga paks, et voolata sujuvalt düüsist välja ilma seda ummistamata. Seega segudes 1-2 ja 1-3 vee ja tsemendi vahekord oli segude 1-1 ja 1-4 vahekordade keskel ning vajumid olid vastavalt 200 mm ja 190 mm. See tagas ühtlase voolamise ning eduka kihtide printimise. Seega parimaks printimiseks peab vee ja tsemendi vahekord olema vahemikus 0,30 ja 0,32 ning vajum vahemikus 190 mm kuni 200 mm. [9]

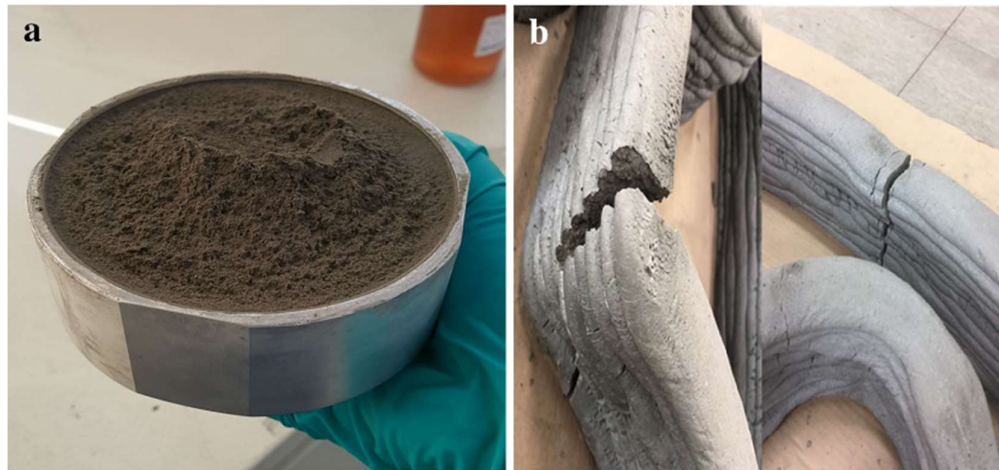
#### 4.3.2. Liiva kogus ja terasuurus

Teine osa kirjeldatud katsest viidi läbi mördi töödeldavuse ja tugevuse suurendamiseks lisades segule liiva. Kasutatud liiva kogus ja terasuurus on näidatud tabelis 4.4. [9]

Tabel 4.4. Segude vahekorrad ja terasuurus [9]

Segu number	CEM I tsement (g)	Vesi (g)	Liiv (g)	Terasuurus	Liiv/tsement vahekord	Koonuse vajum (mm)
2-1	600	189	300	I	0,5	195
2-2	1000	315	400	I	0,4	200
2-3	600	189	200	II	0,333	195
2-4	2000	630	800	II	0,4	198

Terasuurus I on liiv terade läbimõõduga alla 0,8 mm ning II on liiv terade läbimõõduga alla 0,7 mm. Esimeses segus 2-1 kasutati liiva terasuurusega I ning kuna seda oli pool tsemendi kogusest, ummistas see segu düüsi. Sama liiva kasutati segus 2-2 väiksemas vahekorras ja tagajärjena ummistus hakkas esile tulema alles 3 minutit pärast printimise alustamist. Järgmisena kasutati liiva terasuurusega II (terasuurus alla 0,7 mm) segus 2-3 ning ummistus esines 12 minutit pärast printimise algust. Ummistus on näidatud joonisel 4.5.a). Viimases segus 2-4 kasutati vähemas vahekorras liiva ning sein sai edukalt printitud. Järelikult optimaalne vee ja liiva vahekord on 0,4 liiva terasuurusel alla 0,7 mm. Kuid kihtide kuivamisel tekkisid printitud seintesse praod, mis on näha joonisel 4.5.b). [9]



Joonis 4.5. a)Düüsi ummistus. b)Kuivamise järgne pragu. [9]

#### 4.3.3. PVA kiud

Kolmandas katses lisati optimaalsele mördile PVA kiud, et tugevdada segu ja ennetada kuivamise käigus tekkivaid pragusid ja parandada stabiilsust. Segu proportsioonid on esitatud tabelis 4.5. [9]

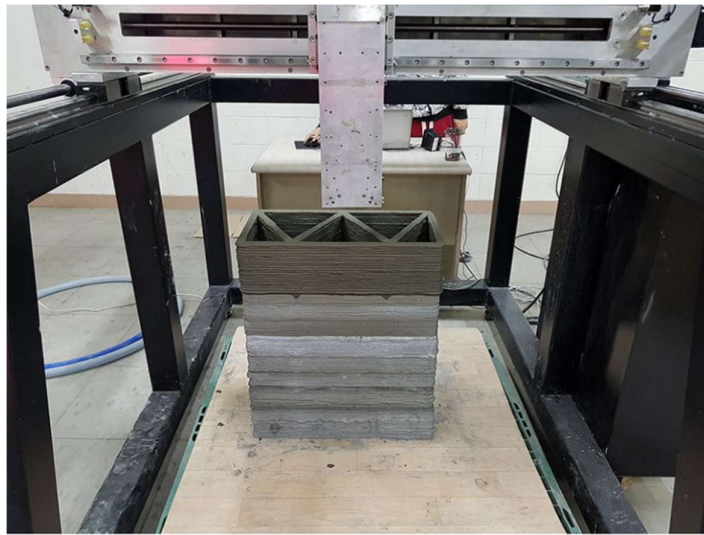
Tabel 4.5. PVA kiudude sisaldava mördi segu proportsioonid [9]

Segu number	CEM I tsement (g)	Vesi (g)	Liiv (g)	PVA (g)	PVA koguse %	Vesi/tsement vahekord	Koonuse vajum (mm)
3-1	2000	630	800	6	0,3	0,315	190
3-2	2000	630	800	4	0,2	0,315	196
3-3	2000	615	800	2	0,1	0,308	198
3-4	5000	1550	2000	5	0,1	0,310	198

PVA kiud lisati erinevas koguses vahemikus 2-6 g, ehk kiud moodustasid vahemikus 0,1-0,3% segu koostisest. Kuigi kõikide segude vajum oli sobivas vahemikus 190 kuni 200mm,

segudes, kus PVA kiud moodustasid rohkem kui 0,2% segust, segisti düüsi sees lakkas töötamast. Segudega 3-1 ja 3-2 printimine peatati vastavalt 9 minutit ja 12 minutit pärast printimise alustamist, sest düüs oli ummistunud kuhjuvate kiududega. Segu 3-3 sisaldas 0,1% PVA kiudusid ning sellega printimine oli edukas. Järjestikuse printimise aja suurendamiseks materjali proportsioone kohandati segus 3-4. Katse tulemusena selgitati välja, et optimaalne kiudude koostisosa segus on 0,1%. [9]

PVA kiudude lisamise tulemuseks oli kindlam segu väljund. Õõnes sein tahkestus edukalt, ilma pragude ja vajumiseta. Joonisel 4.6. näidatud lõpliku seina printimiseks kulus umbes 50 minutit ning selle lõplik kõrgus oli 633 mm, mida moodustasid 96 betooni kihti. [9]



Joonis 4.6. Viimane prinditud sein. [9]

#### 4.3.4. Tugevuse kontrolli kirjeldus

Pärast kolme läbiviidud katset kontrolliti kahest viimasest segust edukalt valminud seinte survetugevused vastavalt Briti Standardi Instituudi [25] poolt välja töötatud betooni katse standardile BS 1881-116:1983 [26]. Segudest 3-3 ja 3-4 valminud seinte survetugevus oli vastavalt 60,4 MPa ja 62 MPa, nagu näidatud tabelis 4.4. Enne katset määrati eeldatud survetugevuseks 50 MPa ning katsekehad ületasid ootused. [9]

Tabel 4.6. Survetugevuse katse tulemused [9]

Segu number	CEM I tsement (g)	Vesi (g)	Liiv (g)	PVA (g)	Vesi/tsement vahekord	Survetugevus (MPa)
3-3	2000	615	3500	2	0,308	60,4
3-4	5000	1550	8750	5	0,31	62

## **5. 3D PRINDITUD BETOONI OMADUSTE JA KOOSTISE ANALÜÜS KIRJANDUSE PÕHJAL**

### **5.1. 3D prinditud betooni omadustest**

#### **Ekstrudeeritavus**

Betooniga printimise protsess algab tema pumpamisega. Segu pumpamisel mahutist peab ta olema pehme ja voolav ning düüsisist väljumise hetkeks peab ta saavutama piisava jäikuse, et hoida kuju ja mitte vajuda. Betooni edukaks pumpamiseks ja ekstrudeerimiseks peavad segul olema tiksotroopilised omadused, ehk töötlemise või jõu rakendamise tagajärjena segu muutub jäigemaks. Düüs on väiksema läbimõõduga, kui väljundtoru ning tihti tekib düüsis suurem surve. See koht on kõige ohtlikum printeri ummistuse tekkimiseks, sest suure surve puhul võivad segu jämedamad koostisosad, näiteks kiud, eralduda ja ummistada düüsi.

#### **Ülesehitatavus ja töödeldavus**

3D prinditud betooni puhul tähendab ülesehitatavus betooni võimet hoida kuju ilma laiali valgumiseta ning toetada järgmisi kihte ilma nende deformeerumiseta ega kokku varisemiseta. Iga järgmise kihi paigutamise vahele jäetud ajavahemik peab olema piisav, et eelmine kiht saaks saavutada suurema kandevõime, aga ka piisavalt lühike, et kihil oleks piisav nake, et hoida järgmist kihti ja siduda ennast sellega. Sellepärast on 3D prinditava betooni puhul tähtis väga kiire tardumine.

Kihtide edukaks printimine võib printida kaks rida kõrvuti nende toestamiseks. Tihtipeale prinditakse seinu selliselt, et prinditakse seina välimine ja sisemine pind ning nende vahele prinditakse sikk-sakk mustiline täidis, et toetada mõlemat pinda.

#### **Segu tugevus**

Betoonisegu tugevuse määrab peamiselt vee ja kuivainete vahekord, kuid on kindlaks määratud, et ka õhumullide jäämine betooni põhjustab betooni tugevuse langemist. Betooni düüsisist väljumisel tekkiva surve all elimineeritakse segus leiduvad õhumullid. Samuti on võimalik mõjutada betoonisegu tugevust segus kasutatavate kiudude kindlas suunas paigutamisega. Olenevalt sellest, mis materjalist kiud on valmistatud, saab nende suunda muuta kas magneti või düüsi kuju abil.

3D prinditud konstruktsioonide kihtidega paralleelselt, ehk külgedel on survetugevus kõige suurem. Samuti on survetugevus suur prinditud kihtidega risti. Kõige väiksem on survetugevus betooni kihtide tasapinnas.

### **Kihtidevaheline side**

Betoonist prinditud kihtide vahel olev nake ja tugevus peavad olema piisavad igas betooni kivistumise staadiumis, et tagada struktuuri püsimist. Prinditavate kihtide vahelise nakke tagab betooni pinna karedus. Kihtidevaheline side on seda nõrgem, mida suurem vahe on kahe kihi printimise vahel, sest betooni töödeldavus kahaneb kiiresti.

### **Prinditavuse ja reoloogia seos**

Reoloogiaks nimetatakse segu viskoossuse, plastsuse ja elastsuse arengut ja muutumist materjalile mõju avaldamisel või jõu rakendamisel. Traditsioonilise betooni reoloogilised omadused ei vasta nendele, mis on vajalikud kolmemõõtmelise printimise jaoks. Selle parandamiseks kasutatakse 3D prinditavas betoonis pigem peenemaid kuivaineid, nagu peen liiv, savi, lendtuhk ja peenräni. Kuid jämedamatel sideainetel on tavapärasel betoonis tähtis roll vähendada materjali kahanemist kivinemise käigus ning omakorda ennetada pragude tekkimist konstruktsioonides. Prinditava betooni reoloogiat vaadatakse tiksotroopia ja viskoossuse järgi.

## **5.2. 3D prinditud betooni koostisest**

Betoonisegu koosneb agregaatidest, tsementsetest materjalidest ja veest. Prinditava betooni tugevus oleneb kasutatud agregaatide suurusest, vee ja kuivainete vahekorra, kiudude kujust ja suurusest. Printimiseks kasutatava värske betooni esialgsete mehaaniliste omaduste areng tardumise jooksul on väga tähtis betoonist valmistatud konstruktsiooni rakendamise jaoks. Algupärased mehaanilised omadused mõjutavad betooni ülesehitatavust, mis omakorda mõjutab kogu konstruktsiooni valmimist.

### **5.2.1. Sideained**

#### **Peenräni**

Peenräni on kõrvalsaadus raudräni sulamisest. Peenräni peamine ülesanne on tihendada betooni täites jämedamate kuivainete vahele jäävad õhuruumid. Betoonisegu viskoossuse ja töödeldavuse parandamiseks lisatakse peenräni ulatuses kuni 3% sideainete massist.

#### **Lendtuhk**

Lendtuhk parandab mördi töödeldavust ning aeglustab betooni tahkumise protsessi, mis omakorda kergendab pumpamise protsessi. Samuti vähendab lendtuha kasutus betooni mahukahanemist kuivamise protsessis. Lendtuhk, mis sisaldab põletamata süsi võib aga vähendada superplastifikaatori mõju.



### **5.2.2. Täitematerjalid ehk agregaadid**

Täitematerjal moodustab suurema osa betooni mahust ning tavaliselt jaotatakse agregaadid peeneks ja jämedaks. Prinditava betooni puhul kasutatakse peenemat täitematerjali, mis on üldiselt läbimõõduga alla 5 mm. Jämedamad täitematerjalid vähendavad segu pumbatavaust ja põhjustavad düüsi ummistust ning muudavad segu vähem töödeldavaks.

### **5.2.3. Lisandid**

#### **Superplastifikaatorid**

Superplastifikaatorid on polümeerid, mida kasutatakse prinditava betooni segu töödeldavuse parandamiseks. Superplastifikaatorid dispergeerivad teisi koostisosi ja kindlustavad segu voolavust, et ta läbiks printeri süsteemi ilma ummistumiseta. Samaaegselt aitavad superplastifikaatorid betoonil hoida kuju pärast printimist ning tagavad segu kiirema kivistumise, et toetada järgmist prinditavat kihti. See tähendab, et superplastifikaatorite koguse suurendamine lühendab ekstrudeerimise aega ja vajab pidevat värsket segu mahutisse lisamist, et jätkata printimist sujuvalt.

Superplastifikaatorid jagunevad enamasti sulfonaatideks, fosfonaatideks ja polükarboksülaatideks. Polükarboksülaadil põhinevad plastifikaatorid on kõige uuemad ning on ka eelistatud nende suure vee vajaduse vähendamise võime pärast.

#### **Kivistumise aeglustid**

Betooni kivistumise protsessis toimub hüdratatsioon, mille käigus vesi reageerib tsemendiga ja liimib täitematerjalid kokku. Selle protsessi jooksul betoonisegu reoloogilised omadused muutuvad kiiresti ning selle aeglustamiseks kasutatakse aeglustavaid koostisosi, milleks on hüdroksü- ja karboksüülhapped ning soolad. Kivistumise aeglustite segusse lisamine võimaldab toota korraga suuri koguseid segu, mis on hea suurte konstruktsioonide printimisel. Kuid aeglustite kasutamisega esineb segu töödeldavuse halvenemist, mis tähendab, et segusse võib lisada ka kiirendit töödeldavuse parandamiseks.

#### **Kivistumise kiirendid**

Kivistumist kiirendavad lisandid aitavad betoonil saavutada suurt tugevust varakult kivistumise protsessis. Sellised lisandid tulevad kasuks kiiremas korras parandamist vajavate ja külmas valatavate konstruktsioonide puhul. Kivistumist kiirendavate ainete hulka kuuluvad naatriumsilikaat, metallipõhised karbonaadid ja anorgaanilised soolad.

## **Savi**

Savid on väga peeneteralised looduslikud settekivimid, mis koosnevad mineraalidest, orgaanilistest ainetest ja metallioksiididest. Oma struktuuri poolest koosneb savi väga õhukestest laastudest, mille vahel liigub vesi väga aeglaselt. Tänu sellisele struktuurile lisab savi betoonisegule plastsust, tõstab segu viskoossust, mis omakorda suurendab värske segu tugevust.

## **Kiud**

Kiudusid kasutatakse 3D printitava betooni mehaaniliste omaduste parandamiseks jämeda täitematerjali puudumise tõttu. Kiudude kasutusega on võimalik vähendada betooni mahu kahanemist kuivamise käigus. Kiudude mõju betoonisegu omadustele oleneb väga palju kiudude suurusest ning sellest, kui suure osa segu mahust nad moodustavad. Isegi kiudude mahu muutus 1% ulatuses võib muuta segu kasutuskõlbmatuks, sest see on liiga paksu konsistentsiga, mis omakorda põhjustab printeri ummistuse.

Kasutatavad kiud võivad olla sünteetilised ja orgaanilised: terasest, klaasist ja süsinikust. Betoonisegu reoloogiliste omaduste parandamiseks sobivad kõige parimini sünteetilised plastikust kiud tänu oma painduvusele.

### **5.2.4. Lisandid betooni omaduste parandamiseks**

Betooni voolavus on tähtis tema ühtlaseks pumpamiseks ja töödeldavuseks. Selleks, et segu oleks piisavalt voolav, lisatakse sellesse Acti-Gel-i ja bentoniit savi [27]. Acti-Gel on puhastatud magneesium alumiiniumsilikaat, mida kasutatakse paljudes veepõhistes ehitusmaterjalides [28]. Acti-Gel stabiliseerib segu, tagades osakeste ühtlase jaotuse ja suspensiooni elektro-mehaanilise protsessi abil [28]. Bentoniit on aga mineraalirikas poorne settekivim, mis samuti teeb segu ühtlasemaks [29].

Segu ekstrudeeritavus on seotud osakeste suuruse, töödeldavuse aja ja kuivamisajaga. Ekstrudeeritavuse tagamiseks lisatakse segusse tselluloosi derivaati [30] karboksüülmetüül-tselluloosi ning rakendatakse isetiheneva betooni ja torkreet-meetodi põhimõtteid. [27]

3D printitava betooni ülesehitatavus tähendab ekstrudeeritud kihtide vahelise sideme tugevust ilma kihtide deformeerumiseta. Sobiva ülesehitatavuse tagamiseks lisatakse segusse viskoossust muutvad ained, nagu superplastifikaatorid, mis vähendavad vajamineva vee kogust. Samuti peaks tsemendis olema madal kipsi sisaldus. [27]

3D printitud konstruktsioonides kasutatava terase koguse vähendamiseks või täiesti terase välja jätmise jaoks korraldati mitmeid katseid, mille käigus betooni segule lisati

erinevaid kiusid [31]. Ühe katse käigus katsetati 3D prinditud betoonisegu mehaanilisi omadusi mitme kiu tüübiga, mille seas olid klaas-, süsinik-, ja basaltkiud [32]. Selle katse tulemusena leiti, et lisades segule süsiniku kiud mahu 1% koguses, suureneb betooni paindejõud 18,5 MPa ehk 174,5% võrra, aga survejõud ei muutunud.

Teise katse käigus uuriti kiududega segu omadusi vedelal ja tahkel kujul [7]. Katse tulemusena leiti, et segule hüdroksüpropüül metüülselluloosi lisamine mõjutab voolavust positiivselt, aga ei muuda kivistumise kiirust.

### **5.3. Koostise analüüs**

Autori poolt koostatud tabelis (Tabel 5.1) on võrdluseks välja toodud kahe eelnevalt kirjeldatud katse käigus väljaselgitatud koostisosade proportsioonid.

Mõlema katse jaoks kasutati betooni segus CEM I tsementi ehk puhast portlandtsementi. Tsement moodustab üle 70% sideainest. Segu sideainete hulka võivad kuuluda lendtuhk ja peenräni. Seejuures vee ja sideaine vahekord esineb vahemikus 0,26 kuni 0,49. Segu agregaadiks on peamiselt peenliiv terasuurusega kuni 2mm. Täitematerjali ja sideaine vahekord varieerub vahemikus 1,5 – 3,0.

Segudes kasutatavate lisandite seas on superplastifikaatorid, kuivamise aeglustid ja kiirendid. Superplastifikaatorid on vahekorras sideainega vahemikus 0,001 – 0,01. Aeglusti ja kiirendi vahekord sideainega ei ületa 0,1.

Erinevate proportsioonidega segudega saavutati 28. kivistumispäevaks katsekehade tugevusi vahemikus 60,4 MPa kuni 110 MPa, mille keskmine väärtus on 85,2 MPa. Kõik valminud konstruktsioonid prinditi düüsidega, mille ava läbimõõt oli vahemikus 9-30 mm. Suuremad düüsid sobivad jämedamate segude puhul. Düüsi valik sõltub prinditava konstruktsiooni kasutuseesmärgist.

Tabel 5.1. 3D printitud betooni koostis

		Hanoi Rahvuslik Tsiiviilehituse Ülikool [20]	Lõuna-Korea Hanyangi Tsiiviilehituse Ülikool [9]	
Sideaine	Tsement	70% CEM I	100% CEM I	
	Lendtuhk	20%	-	
	Peenräni	10%	-	
Vee ja sideaine vahekord		0,26	0,308	0,310
Agregaat	Liiva (tera) suurus	Kuni 2 mm	Kuni 0,7 mm	
	Vahekord sideainega	1,5	1,75	
Lisandid		Superplastifikaator	-	
	Vahekord sideainega	0,01	-	
		Aeglusti	-	
	Vahekord sideainega	0,005	-	
		-	-	
	Vahekord sideainega	-	-	
Kiud		Polüpropüleenkiud (1,2 kg/m <sup>3</sup> )	PVA kiud (0,1% sideainest)	
Survetugevus 28. päeval		110 MPa	60,4 MPa	62 Mpa
Düüsi läbimõõt		9 mm	30 mm	
Kihide arv		61	96	

## 6. MAGISTRITÖÖ KATSE

Antud magistritöö raames korraldatud katse eesmärgiks oli uurida 3D prinditud betooni surve-, tõmbe- ja paindetugevust ning kiudude mõju nendele näitajatele.

Katse viidi läbi kolmes kohas. Kuivsegu ettevalmistamine toimus TalTech peamajas aadressil Ehitajate tee 5 U03 korpuses ning kuivsegu veega kokku segamine ja printimine toimus ehituse katsehallis aadressil Mäepealse 3. Seejärel survekatse toimus Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis.

### 6.1. Lähteandmed

Antud magistritöö katseline osa põhineb peamiselt M. Pogga magistritööl [33] ja magistritöö juhendaja, kaasjuhendaja ning konsultandi kogemustel.

M. Pogga magistritöö põhjal ning lõputöö konsultandi ettenägemisel valiti katsetatava betooni koostiseks:

Tabel 6.1. Betooni koostis [33]

Koostiskomponendid	Korraga segatud kogus (g)	Kogus (kg/m <sup>3</sup> )
Tsement	9 375	687,0
0,0-0,5 terasuurusega liiv	16 875	1057,0
0,5-1,2 terasuurusega liiv	11 250	704,7
Polüpropüleenkiud (6 mm)	18,75	0,44
Kiirendi	93,75	2,17
Superplastifikaator	7,50	0,22
Veehoidvuse suurendamise lisand	18,75	0,43
Vesi (*lisati hiljem)	4669	110,4

Katses kasutati Kunda Nordic Tsemendi CEM I 52,5 R „Ultratsementi“.

Kasutatud liiv ning lisandid tarnis Mira Ehitusmaterjalid OÜ. Lisandite seas olid

- 6mm pikkused polüpropüleenkiud – 0,05% mördi massist
- kaltsiumforminaat kiirendi – 1% mördi massist
- superplastifikaator ConPac - 0,02% mördi massist
- veehoidvuse suurendamise lisand Bermocoll M30 – 0,05% mördi massist

## 6.2. Katseplaan

Kaasjuhendaja ja konsultandi soovitusel pandi paika järgmised katse etapid:

- 1) Mördi kuivainete kokkusegamine
- 2) Mördi segamine veega
- 3) Betoonelemendi printimine
- 4) Surve-, tõmbe- ja paindekatse läbiviimine

## 6.3. Katse käik: kuivainete segamine

21.06.2021 alustati lisandite kaalumise ja Kern KB kaaluga täpsusega 0,01 g. Seejärel kaaluti Kern FKB 65K1A kaaluga tsemendi ja liivad. Kõik koostisosad lisati mördisegistisse (Joonis 6.1).

Betooni koostise tabeli (Tabel 6.1) põhjal segas töö autor kokku 2 erinevat mörhti: esimene kiududega ja teine kiududeta. Kumbagi mörhti segati kahes osas, ehk 37,5 kg kaupa, sest kasutatud mördisegisti (Joonis 6.1) mahutas ainult 40. Iga segu oli segistis umbes 10 minutit ning seejärel kallati see ämbritesse, et transportida laboratooriumisse. Kokku valmistati 75 kg nii kiududega kui ka kiududeta segu.



Joonis 6.1. Kuivsegude segamiseks kasutatud väiksem mördisegisti

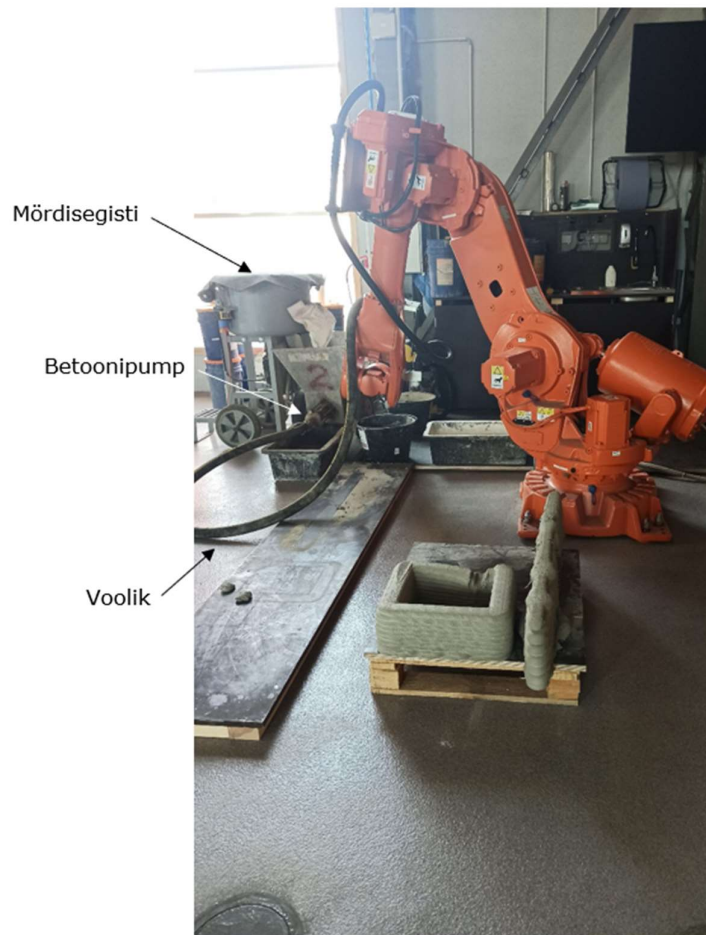
Kiududeta betooni teise poole segamisel selgus, et veehoidvust suurendavat lisandit ei ole piisavalt kohal olemas, ning vajaliku 18,75 g asemel kasutati ainult 15,5 g.

Segusse lisatava vee koguse kättesaamiseks mõõdeti 2x5l vett ning lisati kuivainete sekka seni, kuni katse konsultandi vilunud silma järgi oli konsistents sobiv printimiseks ning seejärel kaaluti allesjäänud vesi.

Kuna printeri arvutiprogramm RobotStudio oli varasemalt seadistatud seinä printimiseks, siis otsustati ka selles katses printida piklikke seinä tükke. Printimiseks kasutatav kood sisestatakse programmi käsitsi ning see oleks olnud liiga vaevarikas, et kirjutada kood ümber mõne muu kuju printimiseks. Otsustati printida kuus kihti betooni, et katsekeha kõrgus oleks ligilähedane tema laiussega.

## 6.4. Katse käik: katsekehade printimine

### 6.4.1. Kiududega betooniga printimine



Joonis 6.2. Betooniprinter

Printimine viidi läbi 21.07.2021. Printimise alustuseks segati mördisegistis (Joonis 6.3 Joonis 6.3) kokku kuivained ja vesi kuni sobiva konsistentsi saavutamiseni. Seejärel lasti betooniprinteril pumbata voolikust läbi vett, et niisutada voolikut. See tagab betoonisegu kergema pumbatavuse ning ei tõmba segust vett välja vooliku seinte niisutamiseks.



Joonis 6.3. Katses kasutatud suurem mördisegisti

Järgmisena lasti valmis betoonisegu printeri pumba (Joonis 6.4) sisse ning käivitati pump. Betoonisegu läbis vooliku ja printeri düüsi tühja ämbrisse ning kui oli näha, et segu voolab stabiilselt, ehk ilma õhuvahedeta, käivitati printer.



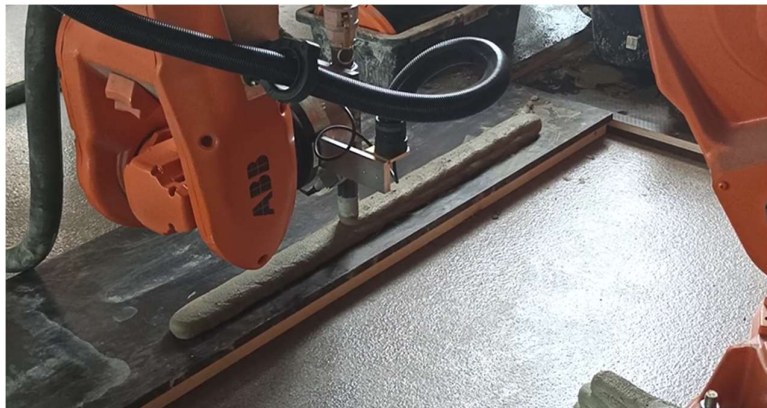


Joonis 6.4. Printeri pump värskesse seguga

Esimene printimine esimese seguga ebaõnnestus segu halva pumbatavuse ja madala töödeldavuse tõttu ning prinditud katsekeha ei jäänud homogeenne. Kõrge printimiskiiruse tõttu tekkisid prinditavasse kehasse tühimikud. Välja pumbatud betoon korjati kokku ning pandi tagasi pumpa uuesti kasutamiseks.

Teine printimine esimese seguga ebaõnnestus, sest printerile programmeeriti printida ainult neli kihti otsustatud kuue asemel. Välja pumbatud betoon korjati kokku ning pandi tagasi pumpa uuesti kasutamiseks.

Kolmas printimine esimese seguga õnnestus, valmis prinditi 6 kihti ühtlase seguga.



Joonis 6.5. Kiududega betooniga printimine



Joonis 6.6. Kiududega betooniga valmis katsekeha

### Vee ja kuivaine vahekord

Katsekeha valmimise järgselt kaaluti ära, et valmistatud kuivsegust jäi alles 6732,6 g ning 10 l veest jäi alles 1,5 l.

Tabel 6.2. Vee ja kuivaine vahekord

Materjal	Valmistatud kogus (kg)	Kasutatud kogus (kg)	Vahekord
Kuivsegu	75	68,2674	0,125
Vesi	10	8,5	

#### 1.1.1. Kiududeta betooni printimine

Pärast eelmist katset lasti betoonil segistist ja pumbast läbi joosta tühja ämbrisse ning seejärel segati mördisegistis kokku uued kuivained ning vesi kuni sobiva konsistentsi saavutamiseni. Voolikust pumbati läbi vett tema niisutamiseks ning alustati betooni pumpamist. Segu segamiseks kasutati samapalju vett nagu eelmise segu puhul realselt vaja läks, ehk 8,5 l.

Kuid koheselt selgus, et betoonitoru on ummistunud sinna sisse jäänud eelmise seguga. Sellepärast oli vaja võtta voolik lahti ning pesta õues puhtaks. Pärast vooliku puhtaks pesemist sujus printimine ning kiududeta betoonist katsekeha valmistamine.



Joonis 6.7. Kaks valmis prinditud 3D betoonist katsekeha kõrvuti

### Vee ja kuivaine vahekord

Tabel 6.3. Vee ja kuivaine vahekord

Materjal	Valmistatud kogus (kg)	Kasutatud kogus (kg)	Vahekord
Kuivsegu	75	58,5492	0,145
Vesi	8,5	8,5	

## 6.5. Katse käik: tugevuskatsed

### 6.5.1. Kolme punkti paindekatsed

Pärast katsekehade 28 päeva vanuseks saamist alustati tugevuskatsetega. Esimesena viidi läbi kolme punkti paindekatsed Tallinna Tehnikaülikooli peahoone U03 korpuses. Lisaks kahele 28 päeva tagasi prinditud katsekehale otsustati viia tugevuskatsed läbi ka ühe vanema katsekehaga, mille vanus oli 64 päeva. Vanem katsekeha oli prinditud täpselt sama koostisega, nagu antud lõputöö raames prinditud kiududega katsekeha.



Joonis 6.8. 64 päeva vana katsekeha

### **Katsekehade ettevalmistus**

Katseeadmed

- Makita nurklihvija

Katse jaoks oli vaja katsekehad ette valmistada. Selleks oli vaja saagida iga katsekeha kolmeks osaks. Samuti saeti igalt katsekehalt osa kihte ära, et kõik katsekehad oleksid umbes ühe kõrgusega. Katsekehade ülemised kihid kitsamad, ning tekitasid riskülikulise ristlõike asemel pigem trapetsi kujulise ristlõike. Kõik katsekehad jäeti umbes 4 kihti kõrgusteks (Joonis 6.9, Joonis 6.10, Joonis 6.11).

64 päeva vanused katsekehad nimetati VK1, VK2 ja VK3. Lõputöö raames prinditud katsekehad kiududega nimetati K1, K2 ja K3 ning ilma kiududeta 1, 2 ja 3.



Joonis 6.9. Lihvimata 64-päevased katsekehad kiududega (VK1, VK2, VK3)



Joonis 6.10. Lihvimata 28-päevased katsekehad kiududega (K1, K2, K3)



Joonis 6.11. Lihvimata 28-päevased katsekehad ilma kiududeta (1, 2, 3)

Iga katsekeha ülemine pind lihviti sirge pinna saavutamiseks ning katsekehade keskel lõigati küljed sirgeteks selleks, et purunemise ristlõige oleks risküliku kujuline.



Joonis 6.12. Lihvitud katsekehad ristkülikulise ristlõikega

### Katse käik ja tulemused

#### Katseseadmed

- 0,1 mm mõõtetäpsusega nihik
- Paindekatse seade, koormuse mõõtetäpsusega 5 kgf

Iga katsekeha lihvitud ristlõige mõõdeti enne katset kolm korda 1 mm täpsusega nihikuga (Tabel 6.4 Tabel 6.4).

Tabel 6.4. Katsekehade ristlõigete mõõdud

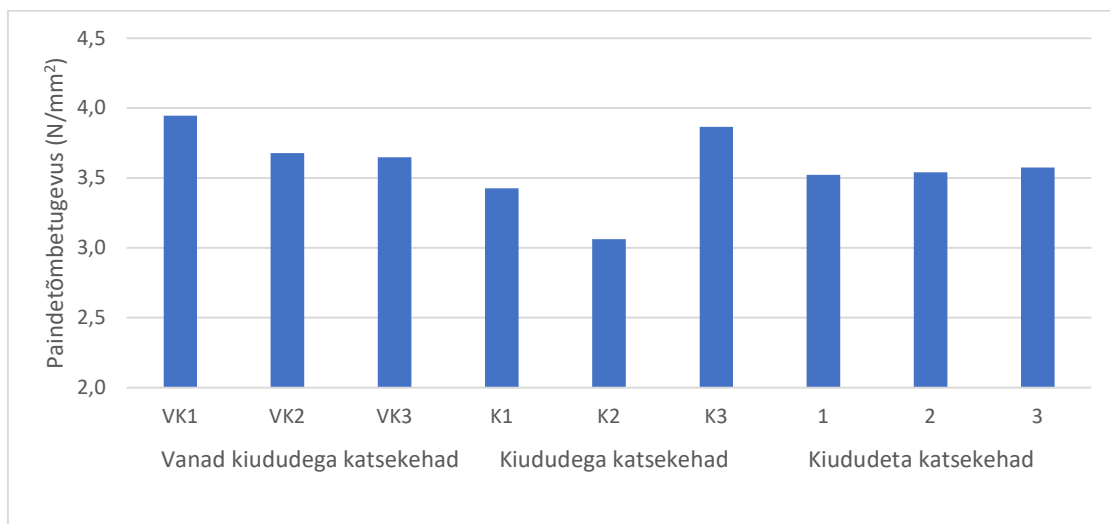
Katsekeha	Laius (mm)			Kõrgus (mm)		
VK1	62	64	65	63	63	63
VK2	66	65	65	59	60	60
VK3	56	55	55	52	52	63
K1	48	48	48	61	61	60
K2	53	51	53	60	61	62
K3	54	52	50	60	61	62
1	66	66	66	62	62	62
2	63	64	64	60	61	61
3	62	62	62	60	60	61

Järgmisena asetati iga katsekeha ükshaaval katseseadmesse kahe toe peale. Tugede vaheks valiti 200 mm. Kasutatud katseseade võimaldas rakendada koormust kuni 2 t ning

mõõtis rakendatud koormust ühikus kgf. 1 kgf on võrdne raskuskiirendusega, mis rakendub 1 kg massiga kehale. Arvutati iga katsekeha paindetugevus (Tabel 6.5).

Tabel 6.5. Paindekatsede tulemused

Katsekeha	Laius pärast purunemist (mm)		Kõrgus pärast purunemist (mm)	Koormus (kgf)	Koormus (N)	Paindetugevus (N/mm <sup>2</sup> )
	Alt	Ülevalt				
VK1	61,8	-	63,1	330	3236,19	3,9
VK2	66,2	-	58,7	285	2794,9	3,7
VK3	53,9	-	51,8	180	1765,2	3,6
K1	43,7	48,1	60,3	185	1814,23	3,4
K2	50,9	50,2	59,9	190	1863,26	3,1
K3	18,0	51,2	60,4	230	2255,53	3,9
1	65,6	64,8	61,8	300	2942	3,5
2	60,0	65,9	60,6	265	2598,76	3,5
3	60,8	61,9	59,9	265	2598,76	3,6



Graafik 6.1. Paindekatsede tulemused

Katsekehade paindetugevus arvutati valemiga

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2}$$

- $f_{ct,fl}$  paindetõmbetugevus (N/mm<sup>2</sup>)
- $F$  koormus (N)
  - 1 kgf = 9,80665 N
- $l$  tugede vaheline kaugus (mm)
- $b$  katsekeha ristlõike laius (mm)
- $h$  katsekeha ristlõike kõrgus (mm)

### Võrdlus standardiga

EVS-EN 12390-5:2019 standardi „Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus“ [34] põhjal paindetõmbetugevuse katse jaoks katsekehale rakendatakse paindemoment, koormates seda ülemiste ja alumiste rullide kaudu. Seejärel suurim vastuvõetav koormus registreeritakse ja arvutatakse paindetõmbetugevus. Mis tähendab, et lõputöö raames läbiviidud katse ei erine oluliselt standardipõhisest katsest.

Erinevus standardist tuleneb sellest, et katsekeha ei olnud valatud ning seetõttu teda ei koormatud risti valamise suunaga, vaid risti prinditud kihtidega.

Katsekehade kuivamiskeskonna temperatuur ei olnud reguleeritud ning survekatse ei olnud läbiviidud 10 tunni jooksul pärast katsekehade hoidmiskeskonnast väljavõtmist, nagu seda nõuaks standard.



Joonis 6.13. Paindekatse tulemusena purunenud katsekeha 1



### 6.5.2. Kihtidevahelise tõmbetugevuse katse

Pärast paindekatse läbiviimist kasutati katsekeha ühte poolt kihtidevahelise tõmbetugevuse katse jaoks. Katse viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli peahoone U03 korpuses.

#### Katsekehade ettevalmistus

Katseseadmed

- Makita nurklihvija
- Moment kahekomponentne epoksiidliim
- Metallsilindrid läbimõõduga 50mm

Katsekehadesse freesiti silindrikujuline sisselõige (Joonis 6.14) välimise läbimõõduga 55 mm ja sisemise läbimõõduga 50 mm ühe prinditud kihi sügavusele.



Joonis 6.14. Katsekehad freesitud silindritega

Iga katsekeha freesitud silindri peale liimiti metallist silindrid (Joonis 6.15) ning jäeti kuivama peaaegu kaheks tunniks. Liimimiseks kasutati Moment kahekomponentset epoksiidliimi.



Joonis 6.15. Katsekehad liimitud silindritega

### **Katse käik ja tulemused**

#### Katseseadmed

- Matest tõmbekatse seade
- AEP transducers indikaatorekraan
- Vineerplaat

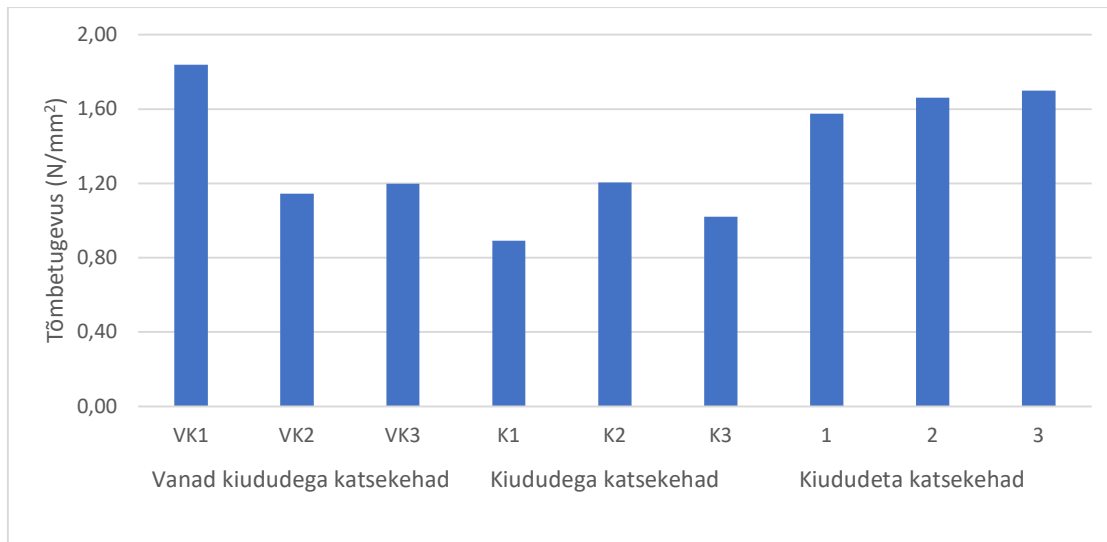
Katse jaoks ühendati katsekehade külge liimitud silindrid katseseadmega ning rakendati jõud. Katsekehade pinna suurendamiseks ning seadmesse sobitamiseks kasutati vineerplaati, millest lõigati 55 mm läbimõõduga ring välja.



Joonis 6.16. Tõmbekatse

Tabel 6.6. Tõmbekatse tulemused

Katsekeha	Koormus (N)	Tõmbetugevus (N/mm <sup>2</sup> )
VK1	3608	1,84
VK2	2246	1,14
VK3	2351	1,20
K1	1751 (tulemust ei arvestata)	0,89 (tulemust ei arvestata)
K2	2365	1,21
K3	2003	1,02
1	3091	1,58
2	3260	1,66
3	3333	1,70



Graafik 6.2. Tõmbekatse tulemused

Katsekeha K1 murdis pooleks enne tõmbepurunemise toimumist ning seda ei võeta arvesse.

Katsekehade tõmbetugevus arvutati valemiga

$$f_t = \frac{F}{A}$$

- $f_t$  tõmbetugevus (N/mm<sup>2</sup>)
- $F$  koormus (N)
- $A$  rakendatava koormuse pindala (mm<sup>2</sup>)
  - $A = \pi \times r^2$



Joonis 6.17. Katsekehad pärast tõmbekatset

### 6.5.3. Survekatse

Survekatse jaoks kasutati paindekatsesest alles jäänud iga katsekeha teine pool. Katsekehade ettevalmistamist alustati Tallinna Tehnikaülikooli peahoone U03 korpuses ning katse viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži laboris. Survekatse läbiviimise ajal olid lõputöö raames prinditud ja varasemalt prinditud katsekehad vastavalt 30 ja 66 päeva vanad.

### Katsekehade ettevalmistus

Selles ajavahemikus, kus tõmbekatse jaoks ettevalmistatud katsekehad kuivasid, valmistati ette survekatse jaoks kuubid. Kivilõikuriga lõigati igast katsekehast välja kuubid ning otsustati, et kõik kuubid vajavad pealmise pinna tasandamist, sest igal katsekehal esines pinna lainetus kivisaega lõikamisest.

Pinna tasandamist tegi töö autor järgmisel päeval iseseisvalt. Selleks kasutati tasandussegu ning klaasplaate, et saavutada klaassirge pinnas.

Tasandussegu koostis on

- CEM I 52,2R
- Kiu karjääri looduslik liiv fraktsiooniga 0 – 2mm

Iga klaasplaat õlitati ning iga plaadi peale pandi natuke segu. Segu peale asetati katsekehad ja külgedele välja surutud segu pühiti ära (Joonis 6.18). Tasandussegu kuivas 24 tundi (Joonis 6.18). Tasandusseguga oli vaja katta ainult üks katsekehade külg, sest teine külg oli prinditud otse sileda aluse peale ning ei vajanud eraldi lihvimist ega tasandamist.



Joonis 6.18. Tasandussegu kuivamas



Joonis 6.19. Katsekehad kuivanud tasandusseguga

## Katse käik ja tulemused

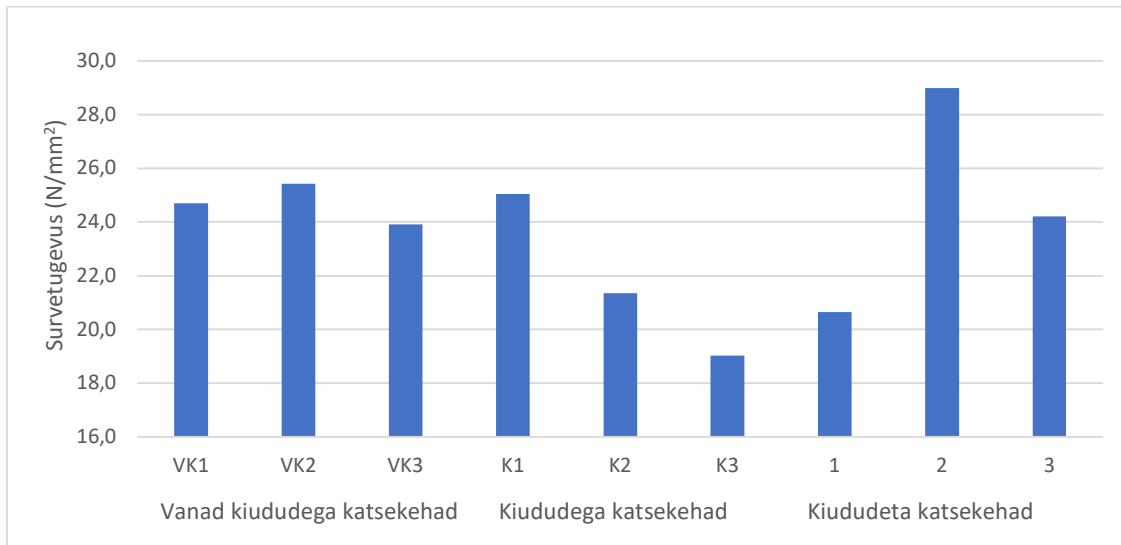
### Katseseadmed

- 0,1 mm mõõtetäpsusega nihik
- Survekatse seade Form-Test Mega 7-2000 -100 0. Koormav silinder kuni 2000 kN. Mõõtetäpsusega 0,1 kN

Iga katsekeha pikkus ja laius mõõdeti 0,1 mm täpsusega nihikuga. Seejärel seadme kõrgust oli vaja reguleerida metallplaatide ning metallrõngastega selliselt, et survesilinder ei ulatuks katse käigus välja rohkem kui 50 mm, mis on tootjapoolne nõue. Samuti oli vaja jälgida, et alles jäänud vahe oleks täpselt piisav katsekeha jaoks. Seejärel asetati katsekeha survepressi metallplaatide vahele ning alustati survekatset. Seade nulliti ning aeglaselt tõsteti alumist metallplaati kuni katsekeha on ülemise ja alumise plaadi vahele fikseeritud. Seejärel hoiti surumise kiirust vahemikus 0,5 – 0,9 kN/s kuni katsekeha purunemiseni. Protsess korrati iga katsekehaga, puhastades surveplaate iga katsekeha vahel. Iga katsekeha purustav jõud kirjutati üles täpsusega 0,1 kN. Hiljem arvutati survetugevus.

Tabel 6.7. Survekatse tulemused

Katsekeha	Laius (mm)	Pikkus (mm)	Pindala (mm <sup>2</sup> )	Purustav jõud (kN)	Purustav jõud (N)	Survetugevus (N/mm <sup>2</sup> )
VK1	43,6	63,8	2781,68	68,7	68700	24,7
VK2	40,9	65,2	2666,68	67,8	67800	25,7
VK3	41,9	53,8	2254,22	53,9	53900	23,9
K1	42,3	45,6	1928,88	48,3	48300	25,0
K2	42,0	52,1	2188,2	46,7	46700	21,3
K3	39,0	50,8	1981,2	37,7	37700	19,0
1	40,7	66,2	2694,34	55,6	55600	20,6
2	41,0	61,5	2521,5	73,1	73100	29,0
3	42,1	61,4	2584,94	62,6	62600	24,2



Graafik 6.3. Survekatse tulemused

Katsekehade survetugevus arvutati valemiga

$$f_c = \frac{F}{b \times h}$$

- $f_c$  survetugevus (N/mm<sup>2</sup>)
- $F$  purustav jõud (N)
- $A_c$  katsekeha ristlõikepind (mm<sup>2</sup>)
  - $A_c = b \times h$
  - $b$  katsekeha ristlõike laius (mm)
  - $h$  katsekeha ristlõik kõrgus (mm)

### Erinevus standardist

EVS-EN 12390-5:2019 standardi „Osa 3: Katsekehade survetugevus“ [35] põhjal survetugevuse katse jooksul katsekehad koormatakse kuni nende purunemiseni ning suurim koormus, mida katsekeha vastu võtab, registreeritakse ja arvutatakse betooni survetugevus.

Erinevus standardist tuleneb sellest, et katsekehad ei olnud täpselt kuubi kujulised ning ei olnud valatud vormi, ehk nende küljed, ei olnud puutunud vormi pinnase vastu. Katsekehad olid väljalõigatud prinditud katsekehast ning nende suurus varieerus.

Koormamiskiirus oli valitud standardi järgi vahemikus  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s.

Katsekehade kuivamiskeskonna temperatuur ei olnud reguleeritud ning survekatse ei olnud läbiviidud 10 tunni jooksul pärast katsekehade hoidmiskeskonnast väljavõtmist, nagu seda nõuaks standard.



Joonis 6.20. Survekatse seade katsekehaga



Joonis 6.21. Survekatse seade katsekehaga

## **6.6. Katsete tulemuste analüüs ja järeldused**

### **6.6.1. Printimine**

Printimise juures tekkinud vooliku ummistuse tõttu on kiududega katsekehas rohkem ebakorrapärasusi, mis võib mõjutada katsekeha tugevust. Ummistus võis olla tingitud kiudude olemasolust või kasutatud vee kogusest.



### 6.6.2. Paindekatse

Paindekatse tulemustest võib näha, et keskmiselt on vanematel kiududega katsekehadel ehk 64-päevastel katsekehadel suurem paindetugevus. Vanemate kiududega katsekehade keskmine paindetõmbetugevus on 3,8 N/mm<sup>2</sup>, aga ka iga eraldi katsetatud katsekeha paindetugevus ei varieerunud väga palju. Lõputöö raames prinditud kiududega ja kiududeta katsekehadel ehk 28-päevastel katsekehadel on keskmiselt väiksem paindetugevus. Nende katsekehade keskmine paindetugevus on nii kiududega kui ka kiududeta katsekehade puhul 3,5 MPa. Kuid kiududega katsekeha puhul peab välja tooma, et omaette katsekehade paindetugevused erinesid teineteisest märkimisväärselt. Kõige väiksem tulemus oli 3,1 MPa ning kõige suurem oli 3,9 MPa. Nii suur erinevus võis olla tingitud printimisel tekkinud ebakorrapärasusest, mille tõttu katsekeha prinditud kihid kitsenesid printimise käigus ning pealmised kihid olid kitsamad, kui alumised.

Tabel 6.8. Paindekatse tulemuste keskmine väärtus

Katsekeha	Paindetõmbetugevus (MPa)	Keskmine paindetõmbetugevus (MPa)
VK1	3,9	3,8
VK2	3,7	
VK3	3,6	
K1	3,4	3,5
K2	3,1	
K3	3,9	
1	3,5	3,5
2	3,5	
3	3,6	

Tulemuste põhjal võib järeldada, et prinditavus ja printimise kvaliteet mõjutavad paindetugevust. Samuti kiudude olemasolu ei mõjuta prinditud betooni paindetugevust. Paindetugevus muutub aga stabiilselt suuremaks betooni pikema kivinemise järel.

### 6.6.3. Tõmbekatse

Tõmbekatse ehk kihtidevahelise nakke katse tulemustest võib näha, et kiududeta 28-päevaste katsekehade tõmbetugevus on märgatavalt suurem, kui kiududega katsekehade puhul.

Uuemate kiududega katsekehade puhul ei võeta ühte tulemust (K1) arvesse, kuna katse ebaõnnestus. Katsekehade VK puhul oli ühe katsekeha tõmbetugevus palju suurem võrreldes ülejäänud tulemustega, mis tõstab ka kõikide VK katsekehade keskmist tõmbetugevust. Prinditud materjali omadused kõiguvad oluliselt ning ehitusprotsessis tuleb töötada suure tagavaraga.

Kiududega katsekehade keskmised tõmbetugevuste väärtused on  $VK=1,39 \text{ N/mm}^2$  ja  $K=1,12 \text{ N/mm}^2$ . Selle põhjal võib järeldada, et pikem kivistumisaeg suurendab prinditud kihtidevahelist tõmbetugevust. Kuid võttes keskmisest väärtusest välja VK tõmbetugevuse, mis kõigub ebanormaalselt, muutub VK keskmine väärtus väiksemaks ja on lähemal K katsekehade keskmisele tõmbetugevusele. Kiududeta katsekehade keskmine tõmbetugevus on palju suurem, kui kiududega katsekehade tõmbetugevus. Võib järeldada, et kiud vähendavad betooni tõmbetugevust.

Tabel 6.9. Tõmbekatse tulemuste keskmine väärtus

Katsekeha	Koormus (N)	Tõmbetugevus (N/mm <sup>2</sup> )	Keskmine tõmbetugevus (N/mm <sup>2</sup> )
VK1	3608	1,84	1,39
VK2	2246	1,14	
VK3	2351	1,20	
K1	1752 (ei arvesta)	0,89	1,12
K2	2365	1,21	
K3	2003	1,02	
1	3091	1,58	1,65
2	3260	1,66	
3	3333	1,70	

#### 6.6.4. Survekatse

Survekatse iga katsekeha rühma tulemuste keskmist väärtust vaadates võib näha, et ilma kiududeta katsekehade keskmine survetugevus on peaaegu võrdne vanemate katsekehade survetugevusega. Uuemate kiududega katsekehade keskmine survetugevus on väiksem. Sellest võib järeldada, et kiududega betoon vajab pikemat kuivamisega, et saavutada samasugune survetugevus, nagu kiududeta betoon pärast 28 päeva kuivamist.

Tabel 6.10.Survekatse tulemuste keskmine väärtus

Katsekeha	Survetugevus (N/mm <sup>2</sup> )	Keskmine survetugevus (N/mm <sup>2</sup> )
VK1	24,7	24,8
VK2	25,7	
VK3	23,9	
K1	25,0	21,8
K2	21,3	
K3	19,0	
1	20,6	24,6
2	29,0	
3	24,2	

## 7. KOKKUVÕTE

3D printimise tehnoloogia vastu on maailmas aina kasvav huvi. Kolmemõõtmelise printimise rakendamist ehitusvaldkonnas ja betoonkonstruktsioonide valmistamises uuritakse aina rohkem ja rohkem. Betooniga kolmemõõtmelise printimisega on võimalik vähendada konstruktsiooni püstitamise aega ning töökohaga seotud riske automatiseerides ehitusprotsessi. Samuti vähendab tehnoloogia rakendamine kasutatava betooni kogust ning võimaldab püstitada keerukamaid konstruktsioone.

Kõige suurema raskuse betooni 3D printimise puhul kujutab endast õige segu valmistamine. Segu proportsioonidest ja valitud lisanditest olenevad printitava konstruktsiooni mehaanilised omadused ja ka printimise protsessi edukus. Sobiv segu peab olema optimaalse konsistentsiga, et tagada betooni tugevust ja printitud kihtide omavahelist sidet.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja selgitada 3D printitava betooni koostise kirjanduse analüüsi ning katsetada ühe betoonisegu tugevusomadusi. Eesmärgi saavutamiseks analüüsiti kahte katset ja nende tulemusi ning viidi läbi katse.

Kirjanduse põhjal selgunud 3D printitava betooni kõige tähtsamad omadused on ekstrudeeritavus, ülesehitatavus ja töödeldavus. Neid omadusi mõjutavad betoonisegu koostisosad ning ka koostisosade väike muutus võib avaldada segu omadustele suurt mõju. 3D printitava betoon koosneb sideainest, täiteainest ehk agregaadist, lisanditest ja veest. Sideaineteks on tsement, lendtuhk ja peenräni ning täiteaineks on liiv. 3D printitavas betoonis kasutatavad lisandid võivad olla superplastifikaatorid, kivistumise aeglustid ja kiirendid, kiud, savid ning veehoidvust suurendavad lisandid.

Magistritöö raames läbiviidud katse käigus printiti valmis kaks katsekeha, millest üks sisaldas kiudusid ning teine ei sisaldanud. Katsekehad kivistusid 28 päeva ning seejärel viidi läbi painde-, tõmbe- ja survekatse mõlema katsekehaga. Lisaks viidi tugevuskatsed läbi ka 64 päeva kivilinenud kiududega katsekehaga.

Paindekatse tulemused näitasid, et katsekehad, mis kivistusid kauem, ehk 64 päeva, oli suurema paindetugevusega. Kuid 28 päeva kuivanud katsekehade seas ei olnud kiududega ja kiududeta katsekehade paindetugevuses erinevust, ehk kiud ei mõjutanud paindetugevust. Tõmbekatse tulemuste põhjal on näha, et kiududeta katsekehadel on kõige suurem kihtidevaheline tõmbetugevus. Nii vanematel, kui ka uuematel kiududega katsekehadel oli sarnane tõmbetugevus. Võib järeldada, et kiud vähendavad betooni tõmbetugevust. Survekatse tulemuste põhjal selgus, et kiududeta katsekehade survetugevus on sarnane 64 päeva kivilinenud kiududega katsekehade survetugevusega.

Kiududega betoon peab kivinema pikemalt, et saavutada samasugune survetugevus, nagu kiududeta betoon pärast 28 päeva kivistumist.

Parima segu koostise väljatöötamiseks peab jätkama katsete läbiviimisega ja tulemuste analüüsimisega, et jõuda optimaalse koostise ja proportsioonideni, mis tagavad kõik betooni kolmemõõtmeliseks printimiseks vajalikud omadused.

## **8. SUMMARY**

There is a rising interest towards the 3D printing technology. The application of 3D printing in the construction industry and the manufacture of concrete structures is being increasingly investigated. By 3D printing of concrete structures, it is possible to reduce time and workplace risks and injuries. The application of 3D printing technology can greatly reduce the amount of concrete used and produced and enable structures with more intricate designs to be built.

The biggest challenge with concrete 3D printing is preparing the suitable concrete mix. The mechanical properties and success of the printing process depend on the choice of the right proportions and additives for the mix. A suitable mix must have optimal consistency to provide the strength of the concrete and a bond between the printed layers.

The aim of this thesis was to analyse the mix design for 3D printing concrete based on literature and find out its strength properties of one concrete mix design. To achieve the aim of the thesis, two tests were analyzed based on the literature and a test was carried out.

Based on the analysis of the literature, the main properties of 3D printed concrete are extrudability, buildability, and workability. These properties are influenced by the components of the mix, and even a slight change in those components can have a great effect on the properties. 3D printed concrete consists of binder, aggregate, additives, and water. Binders are usually cement, fly ash, and silica fume, and the aggregate is usually sand. The additives used in the 3D printed concrete mix are superplasticizers, retarders, accelerators, fibers, and additives that increase the retention of water in the mix.

During the test conducted for this thesis, two test subjects were printed. One of them had fibers in the concrete mix, and the other one did not. Once the test subjects reached the age of 28 days, flexural, tensile, and compressive strength tests were performed. In addition, a test subject with fibers that had hardened for 64 days was tested.

The results of the flexural strength test showed that the test subjects that had been drying longer (for 64 days) had reached higher flexural strength. There was no difference in the flexural strength of the 28-day test subject with and without fibers, which means that fibers do not affect the flexural strength. Among the results of the tensile strength test the test subjects without fibers had the highest tensile strength. Older and newer test subjects with fibers had similar tensile strength. It can be concluded that fibers cause lower tensile strength. The results of the compressive strength test showed that the test subjects without fibers and the older test subjects with fibers had a higher compressive strength. The newer test subjects with fibers had the lowest compressive strength and will

need additional hardening time to reach the compressive strength of the test subjects without fibers.

Further laboratory tests and analyses must be performed to create an optimal mix design and proportions, which will ensure the properties needed for successful 3D printing with concrete.

## 9. KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] "What is 3D printing? How does a 3D printer work? Learn 3D printing." <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/> (20.02.2021).
- [2] "3D Printing History | AV Plastics." <http://www.avplastics.co.uk/3d-printing-history> (24.02.2021).
- [3] "3D-printimistehnoloogia - Uudised - Deep Mold Co., Ltd." <http://m.ee.deepmould-de.com/news/3d-printing-technology-29062903.html> (24.02.2021).
- [4] T. Egert Pedassaar, K. Soots, and T. Lillerand, "EESTI MAAÜLIKOOL 3D PRINDITUD DETAILIDE JÄRELTÖÖTLEMISE TEHNOLOOGIA POSTPROCESSING TECHNOLOGY OF 3D PRINTED PARTS Bakalaureusetöö Tehnika ja tehnoloogia õppekava."
- [5] "Carbon3D: 3D-printimine On Tehtud Kiiremini - Tehnoloogia 2021." <https://et.esotericcosmos.com/carbon3d-3d-printing-made-faster-328919> (04.03.2021).
- [6] "3D-printimise kasutusala ja tehnoloogiad – 3dmodelleerimine." <https://3dmodelleerimine.wordpress.com/3d-printimise-kasutusala-ja-tehnoloogiad/> (24.02.2021).
- [7] B. Panda, Y. W. D. Tay, S. C. Paul, and M. J. Tan, "Current challenges and future potential of 3D concrete printing," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 49, no. 5, pp. 666–673, May 2018, doi: 10.1002/mawe.201700279.
- [8] "3dprintedhouse: Project - Why 3D Concrete Printing?" <https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/why-3d-concrete-printing/> (12.04.2021).
- [9] J. H. Jo, B. W. Jo, W. Cho, and J. H. Kim, "Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 14, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1186/s40069-019-0388-2.
- [10] S. Hou, Z. Duan, J. Xiao, and J. Ye, "A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design," *Construction and Building Materials*, vol. 273. Elsevier Ltd, p. 121745, Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745.
- [11] J. Zhang, J. Wang, S. Dong, X. Yu, and B. Han, "A review of the current progress and application of 3D printed concrete," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 125. 2019. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105533.
- [12] "remont-betona." <http://est.srgehitus.ee/page11.html> (11.03.2021).
- [13] E. Uustalu and M. Rõõmusoks, "Isetihenev betoon," *Ehitaja*, 2002.



- [14] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research," *Cement and Concrete Research*, vol. 112. Elsevier Ltd, pp. 37–49, Oct. 01, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
- [15] "3ders.org - Spain unveils world's first 3D printed pedestrian bridge made of concrete | 3D Printer News & 3D Printing News." <http://www.3ders.org/articles/20161214-spain-unveils-worlds-first-3d-printed-pedestrian-bridge-made-of-concrete.html> (19.03.2021).
- [16] R. Allouzi, W. Al-Azhari, and R. Allouzi, "Conventional Construction and 3D Printing: A Comparison Study on Material Cost in Jordan," *Journal of Engineering*, vol. 2020, pp. 1–14, May 2020, doi: 10.1155/2020/1424682.
- [17] "Gothic Construction Techniques Inspire ETH Zurich's Lightweight Concrete Floor Slabs | ArchDaily." <https://www.archdaily.com/869192/gothic-construction-techniques-inspire-eth-zurichs-lightweight-concrete-floor-slabs> (02.05.2021).
- [18] "OUR TECHNOLOGY | D-shape." <https://d-shape.com/our-technology/> (06.05.2021).
- [19] M. T. Souza, I. M. Ferreira, E. Guzi de Moraes, L. Senff, and A. P. Novaes de Oliveira, "3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects," *Journal of Building Engineering*, vol. 32. Elsevier Ltd, p. 101833, Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.job.2020.101833.
- [20] T. T., S. A. Austin, S Lim, R. A. Buswell, A G F Gibb, and T Thorpe, "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete", doi: 10.1617/s11527-012-9828-z.
- [21] "Coal Fly Ash - User Guideline - Portland Cement Concrete - User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction - FHWA-RD-97-148." <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/cfa53.cfm> (13.05.2021).
- [22] D. Suresh and K. Nagaraju, "Ground Granulated Blast Slag (GGBS) In Concrete-A Review," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN*, vol. 12, no. 4, pp. 76–82, doi: 10.9790/1684-12467682.
- [23] "Karjäär või jõe liiv - mis vahe on? - Soojenemine 2021." <https://est.gillmanbuilders.com/pesok-dlja-drenazha-rechnoj-ili-karernyj> (13.05.2021).
- [24] "PVA." [https://e-ope.khk.ee/ek/2012/moobli\\_ja\\_puittoodete\\_viimistlemine/materjalid/pva.html](https://e-ope.khk.ee/ek/2012/moobli_ja_puittoodete_viimistlemine/materjalid/pva.html) (25.04.2021).
- [25] "Standards, Training, Testing, Assessment and Certification | BSI." <https://www.bsigroup.com/> (29.04.2021).
- [26] "BS 1881-116:1983 Methods of testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes (AMD 6097) (AMD 6720), British

Standards Institution - Publication Index | NBS."

<https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=BSI&DocID=70016> (29.04.2021).

- [27] Enno, "KIVISTUNUD BETOONI KATSETAMINE Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus Testing hardened concrete Part 5: Flexural strength of test specimens," 2019. [Online]. Available: [www.evs.ee](http://www.evs.ee);
- [28] Enno, "KIVISTUNUD BETOONI KATSETAMINE Osa 3: Katsekehade survetugevus Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens," 2019. [Online]. Available: [www.evs.ee](http://www.evs.ee);
- [29] A. Siddika, M. Abdullah Al Mamun, W. Ferdous, A. Kumer Saha, R. Alyousef, and A. Siddika, "Journal of Sustainable Cement-Based Materials 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges", doi: 10.1080/21650373.2019.1705199.
- [30] "Acti-Gel® Purified Magnesium Aluminosilicate | Products." <https://activeminerals.com/products/acti-gel-208/> (18.04.2021).
- [31] "(PDF) Utilization of Bentonite in Concrete: A Review." [https://www.researchgate.net/publication/333619133\\_Utilization\\_of\\_Bentonite\\_in\\_Concrete\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/333619133_Utilization_of_Bentonite_in_Concrete_A_Review) (18.04.2021).
- [32] "EESTIS KEHTIVA EUROOPA PATENDI PATENDIKIRJELDUSE TÕLGE." <https://www1.epa.ee/ep/Eptolke/E000750.pdf> (18.04.2021).
- [33] D. G. Soltan and V. C. Li, "A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing," *Cement and Concrete Composites*, vol. 90, pp. 1–13, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017.
- [34] M. Hambach and D. Volkmer, "Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste," *Cement and Concrete Composites*, vol. 79, pp. 62–70, May 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001.
- [35] "Hollandi professor tutvustas TTÜs 3D-prinditud betooni | Digigeenius." <https://digi.geenius.ee/rubriik/teadus-ja-tulevik/hollandi-professor-tutvustas-ttus-digitaalselt-valmistatud-betooni/> (17.04.2021).
- [36] "World's First 3D Printed Bridge Opens in Spain | ArchDaily." <https://www.archdaily.com/804596/worlds-first-3d-printed-bridge-opens-in-spain> (14.04.2021).
- [37] "A World First: the first fully 3D printed, structurally pre-stressed concrete cycle bridge in the world - - BAM News." <https://www.bam.co.uk/media-centre/news-details/a-world-first-the-first-fully-3d-printed-structurally-pre-stressed-concrete-cycle-bridge-in-the-world> (19.03.2021).
- [38] "SILD PRINTERIST | Valmis maailma esimene betoonist 3D-prinditud sild - Moodne Kodu - sisustus -ja disaini portaal." <https://moodnekodu.delfi.ee/artikkel/80008596/sild-printerist-valmis-maailma-esimene-betoonist-3d-prinditud-sild> (17.04.2021).

- [39] "Czech Republic's 'first-ever' floating 3D-printed house now complete."  
<https://kafkadesk.org/2020/07/03/czech-republics-first-ever-floating-3d-printed-house-now-complete/> (19.03.2021).
- [40] "3dprintedhouse: Project - Project Milestone."  
<https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone/> (14.04.2021).
- [41] "3dprintedhouse: Project - What are we printing?"  
<https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/what-are-we-printing/>  
(14.04.2021).