



**TALLINNA
TEHNIKA KÕRGKOO**

Mark-Eric Lille

MOBIILNE 3D-BETOONI PRINTER

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2021



Mark-Eric Lille

MOBIILNE 3D-BETOONI PRINTER

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Hoonete ehituse õppekava

Juhendaja: Aivars Alt ja Lauri Peetrimägi

Tallinn 2021

Mina,

Mark-Eric Lille,

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autoritele ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendajate nimed Aivars Alt ja Lauri Peetrimägi

/allkirjastatud digitaalselt/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

Mark-Eric Lille

sünnikuupäev: 22.12.1996

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Mobiilne 3D-betooni printer

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas,

/allkirjastatud digitaalselt/

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Mark-Eric Lille**
Õpperühm: **HE81**
Eriala: **Hoonete ehitus**
Lõputöö teema: **Mobiilne 3D-betooni printer**

Lähteandmed töö koostamiseks:

Betooniprinterite tootjate poolt avaldatud tehnilised kirjeldused
TTK laboris *gantry*-tüüpi printeril läbi viidud arendustöö tulemused ja intervjuud
printimismeeskonna liikmetega

Töö sisu, üleschitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Mobiilse 3D betooniprinteri eelised ja puudused võrreldes traditsioonilise betoonitehnoloogiaga. Mõju ehitise valmimise kiirusele ja kvaliteedile. Printitava ehitise gabariidid. Printimise täpsus. *Gantry*-tüüpi ja robotkäsi-tüüpi masinate erinevus, eelised ja puudused. Mobiilse printeri hooldamine. Mobiilsus. Printeri komponendid. Printimissegu. Ilmastiku mõju mobiilsele 3D-printimisele. Printeri ja vajalike tarvikute transport. Printimismeeskonna koosseis. Tarkvara. Intervjuud betooniprinteri meeskonna liikmetega. Lähteüleande koostamine mobiilse 3D betooniprinteri hankimiseks.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:

Lõputöö seletuskirja maht on 40-60 lehekülge, lisade maht kuni 20 lehekülge ja graafilise osa maht vastavalt vajadusele.

Lõputöö
juhendajad: Lauri Peetrimägi,
Aivars Alt

 22.02.2021
 22.02.2021
(allkiri) (kuupäev)

Lõpetaja: Mark-Eric Lille

 22.02.21
(allkiri) (kuupäev)

Kinnitaja: Aivars Alt
ehitusinstituudi direktor

 22.02.2021
(allkiri) (kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 15.02.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg: 19.04.2021

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	8
1 ÜLEVAADE MOBIILSE 3D-PRINTERI TAUSTAST	9
1.1 Betoontöödest üldiselt	9
1.2 3D-printeri tehnoloogiad	10
1.2.1 Sildprinterite ja mobiilse printeri võrdlus	11
1.3 Mobiilse 3D-printeri vajalikkus.....	14
1.3.1 Eelised ja puudused võrreldes tavaliste betoontöödega	14
1.4 Prinditavad hooned ja rajatised.....	16
1.4.1 Ehitise või rajatise kvaliteet, gabariidid ja valmimise kiirus.	18
2 ÜLEVAADE TEHTUD TÖÖDEST TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO LIS	19
2.1 Erinevad prinditud elemendid ja segud	19
2.2 Printimise arendus	20
2.3 Laskepesade printimine	21
2.3.1 Konstruktsiooni printimine ja vastupidavuse katsetamine.....	21
2.3.2 Erinevad lisandid segus ja nende mõju	23
3 INTERVJUUD PRINTERIT OPEREERIVA MEESKONNAGA.....	24
3.1 Üldine	24
3.1.1 Miks on vaja mobiilset 3D printerit? Kuidas mõjutab kvaliteeti? Eelised ja puudused võrreldes tavaliste betoontöödega.	24
3.1.2 Mida prinditakse?	24
3.1.3 Mis on printimise täpsus ja maksimaalne rajatise või ehitise suurus?	24
3.2 3D-printer oma olemuselt ja sellega seonduvad ülesanded.....	25
3.2.1 Kas võtta kasutusele sildprinter või mobiilne printer?.....	25
3.2.2 Kuidas hooldada masinat? Kas sellel on eraldi hoolduskapp? Kuidas toimub varuosade järelteenindus?.....	25
3.2.3 Millistest komponentidest masin koosneb ja kas see on distantsilt juhitud?.....	25
3.2.4 Kus hoitakse kuivsegu platsil?	25
3.2.5 Kuidas vahetatakse masina komponente tulevikus?	25
3.2.6 Kuidas doseeritakse lisandit segule?	26

3.2.7	Milline võiks olla minimaalne vajalik ruum masina tööks?	26
3.2.8	Kuidas integreeritakse pumpamis- ja segamisüksus?	26
3.2.9	Mis on segu hind ja millised tehnilised näitajad on tootja enda segul?	26
3.3	Ilmastik	26
3.3.1	Kuidas tuleb toime masin halva ilmaga ja maastikuga? Printimine väga külma või soojaga. 26	
3.3.2	Kuidas kaitsta ehitusmaterjale halva ilma eest?	27
3.3.3	Kuidas printida vihma ja tuulega?.....	27
3.3.4	Kuidas toimetatakse segu platsile?.....	27
3.3.5	Kas printer sõidab ise platsile või ta veetakse sinna?.....	27
3.4	Brigaadi koosseis ja ülesanded	27
3.4.1	Kuidas säilitada brigaadi mugavat keskkonda ja töövoolu?	27
3.4.2	Mitu liiget on brigaadis? Mis oleks eesmärk?.....	28
3.4.3	Mida sisaldab meeskonna väljaõpe?	28
3.5	Tarkvara lahendused.....	28
3.5.1	Milliseid tarkvarasid kasutatakse? Miks?	28
3.5.2	Tarkvara arenduse trendid.	29
3.5.3	Kui tihti on vaja tarkvara uuendada?.....	29
3.5.4	Tarkvara kasutus mobiilsel printeril.....	29
4	MOBIILSE 3D-PRINTERI MASIN	30
4.1	Masina tüüp	30
4.2	Masina hooldus.....	30
4.3	Masina komponentide ülevaade ja juhitavus.....	30
4.4	Segu käsitlemine platsil	33
4.5	3D-printeri transportimine	34
5	ILMASTIKUGA SEOTUD TAKISTUSED JA LAHENDUSED	35
5.1	Halva ilmaga printimistööde teostamine	35
5.1.1	Printimine külma ilmaga	35
5.1.2	Printimine kuuma ilmaga	35
5.2	Printimine raskel maastikul	36
5.3	Ehitusmaterjalide kaitse.....	36

6	BRIGAADI KOOSSEIS	37
6.1	Tööülesannete jaotumine ja meeskonna liikmete arv	37
6.2	Mugav töökeskkond ja töövoolu hoidmine	37
6.3	Meeskonna väljaõpe	38
7	LÄHTEÜLESANNE SEADME TOOTJALE	39
	KOKKUVÕTE.....	41
	SUMMARY	42
	VIIDATUD ALLIKAD.....	43

SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö eesmärk on anda ülevaade mobiilsest 3D-printerist ning kokku panna lähteülesanne, mis esitatakse tootjale printeri hankimiseks.

Suur osa hooneid ja rajatisi maailmas on ehitatud betoonist. Pikka aega on tehtud betoonitöid raketistega või erinevate vormidega. Selline tehnoloogia on nõudnud ja nõuab endiselt väga palju loodusressursse ja aega. Selline ehitustegevus on mõjutanud ka maailma kliimat. Maailmas otsitakse tehnoloogilisi arendusi, mis hoiaksid kokku ressursse ja vähendaksid ehituse ökoloogilist jalajälge. 3D-printeri tehnoloogial on potentsiaal vähendada materjali kasutust betoonitööde tehnoloogias ja jätta väiksem jälg kliimale.

3D-printereid toodavad tänapäeval mitmed ettevõtted. Igal ettevõttel omalaadne printer, kas siis sildprinter, mobiilne printer või hübriid. Tarkvarade kasutus võib samuti erineda. Käesolevas töös võrreldakse sildprinterit ja robot-käega mobiilset printerit. Tuuakse välja eelised ja puudused, miks on 3D-printimise tehnoloogia parem variant kui traditsiooniline betoneerimine. Selgitatakse, kuidas mõjutab uus tehnoloogia hoone või rajatise kvaliteeti ning ehitamise kiirust.

Kui võrrelda tavalist betooni ja printimise segu, siis erinevus on suur. Printimisel kasutatav segu on teistsuguse koostisega, sest betoon peab kiiresti kividest ja hoidma vormi, et see töötlemisel laiali ei valguks. Printimistööd võivad mõjutada erinevad ilmastiku tegurid. Töös kirjeldatakse, kuidas käsitletakse segu platsil ja millistes tingimustes toimuvad printimistööd. Samuti kajastatakse ka ehitusmaterjalide hoiustamise küsimust.

Ajaline ressurss on üks võimalikke eeliseid 3D-printeri puhul. Kui muidu traditsioonilise ehituse puhul on vaja rohkem töölisi ja rohkem aega, et hoonet ehitada, siis 3D-printeri puhul on võimalik ajaline kokkuhoid. Printer võib tööd teha ööpäev läbi, mis on eeliseks tavalisele 8-tunnisele tööpäevale. Printeri opereerimiseks ei ole vaja palju töölisi, millest tuleb ka rahaline kokkuhoid. Viimastes peatükkides selgitatakse mitme liikmeline on brigaad, kuidas meeskond opereerib mobiilse printeriga, milline on kasutatav tarkvara ja kuidas toimub transport objektile.

Lisaks on töös välja toodud lähteülesanne mobiilse printeri tootjale ning eraldi peatükid, mis käsitlevad tehtud töid Tallinna Tehnikakõrgkoolis ning meeskonnaliikmete intervjuueringi käigus kogutud infot.

1 ÜLEVAADE MOBIILSE 3D-PRINTERI TAUSTAST

1.1 Betoonitööst üldiselt

Betooni algusaastat võib lugeda sõltuvalt sellest, kuidas me defineerime mõistet „betoon“. Muistsetel aegadel kasutati toortsementi, mis saadi kipsi või lubjakivi purustamisel ja põletamisel. Nendele vee ja liiva lisamisel saadi mörditaoline segu. Tuhandete aastate jooksul täiustati ja kombineeriti erinevaid materjale ning lõpuks tuletati sellest protsessist kaasaegne betooni segu. Esimesed betoonilaadsed ehitised valmisid Nabataea kauplejate või beduiinide poolt. Nad arendasid umbes 6500 eKr Süüria lõunaosas ja Põhja-Jordaania väikese impeeriumi. [1]

Ajast edasi minnes – aastal 1823, töötati Suurbritannias välja Portlandi tsement Joseph Aspdini poolt (Joonis 1). See nimi tuleneb tsemendi sarnasusest Portlandi kiviga, mis on Inglismaal, Dorsetis, Portlandi saarel lammutatud ehituskivi tüüp. Umbes samal perioodil, aastal 1849, töötas Joseph Monier välja esimese raudbetooni. See kõik pani aluse tänapäeva ehituse tehnoloogiale. 1913. aastal hakati betoonisegu vedama autodega, mis oli revolutsiooniline betoonitööde jaoks (Joonis 2). [2]



Joonis 1. Joseph Aspdin [2]



Joonis 2. 20.sajandi alguses seguauto [1]

1.2 3D-printeri tehnoloogiad

Kui vaadata tagasi ajalukku siis 3D-printeri juured ulatuvad 1950ndatesse. Roboti poolset müüriladumist uuriti 1950ndatel. Sellega seotud tehnoloogiaarendus automatiseeritud ehituse ümber algas 1960ndatel aastatel pumbatud betooni ja isotsüanaatvahtudega. Mis tähendas seda, et betooni hakati pumpama, mitte ei tassitud enam käsitsi. Algust tehti Jaapanis ja kasutati 3D-printimisele sarnaseid võtteid. [3]

3D-printimise tehnoloogia varajane väljatöötamine ja uurimine algas aastal 1995. Joseph Pegna leiutas esimese meetodi, mis keskendus liiva ja tsemendi vormimistehnikale. Seal kasutati auru materjalide sidumiseks kihtidena, kuid seda meetodit ise mitte kunagi ei demonstreeritud. Teise meetodi leiutas Behrokh Khoshnevis, mis algas algselt uudse keraamilise ekstrusiooni ja vormimise meetodina. See oli alternatiiv tekkivatele polümeeri ja metalli 3D-printimise tehnikatele, mis patenteeriti 1995. See pani aluse ning kuni tänapäevani on tehtud väga palju uuendusi. [3]

Hetkel töötatakse ja arendatakse uusi tehnoloogiaid. Kasutuses on nii sildprinterid kui ka mobiilsed printerid. Printereid tootvad ettevõtted on lähenenud erinevalt seadmele. See, mida näidatakse meedias, ei vasta alati sellele, mis toimub tegelikult printimisel. Kui meedia räägib, et töötati välja uus tehnoloogia,

mis prindib väga efektiivselt siis päriselt ei pruugi see nii olla. Tegelikult ollakse alles kiires arengu etapis ning katsetatakse uusi tehnoloogilisi lahendusi.

2018. aastal sõlmis 3D-printimise ettevõtte COBOD International turustuslepingu Saksamaa PERI Grupiga. PERI on juhtiv ettevõtte Saksamaa, Šveitsi ja Austria ehitusturgudel. Leping sõlmiti põhjusel, et nende kolme piirkonna kliendid saaksid rentida COBODi printereid. Tänu COBODile valmis möödunud aastal(2020) kahekorruseline eluhoone, mis vastab Saksamaa nõuetele. See on ehitusturu jaoks suur samm. COBOD on sildprinter, mis pannakse kokku moodulitena, analoogselt tornkraanaga. Kokkupanek võtab aega kuni 48 tundi. [4]

See tähendab väga suurt hulka elemente, mida peab platsile kohale transportima. Kõik sõltub hoone või rajatise suurusest. Mida suurem on prinditav hoone, seda suurem raam sildprinteri puhul peab olema kokku pandud.

Sildprinteril on mitmeid eeliseid suurte detailide ja hoonete printimisel. Seadmel on vähem elemente, mida peab kohale transportima. Mobiilne printer saab sõita ise veokile ja teda on mugavam transportida. Platsil on võimalik seda kiiremini valmis seada võrreldes sildprinteriga.

Veel üks uuendus, mis tehti hiljuti betooni printimisel, oli ümmarguse pea asendumine kandilisema variandiga. See tähendab seda, et varem prinditud seinal oli näha tugevaid triipe ja sein võis kergemini stabiilsust kaotada. Printerile paigaldatud otsik jätab väljunud betooni kandilise kuju. Tulemuseks on tasasemad ja stabiilsemad pinnad.

1.2.1 Sildprinter ja mobiilse printeri võrdlus

Sildprinter on välimuselt lihtne raam. Samas mobiilne printer on oma olemuselt nii nagu nimi ütleb – mobiilne. Tavaliselt liigub masin ratastel või lintidel ja ülesehituse poolest on teistsugune. Allpool on välja toodud pildid sildprinterist (Joonis 3) ja tootja mobiilsest printerist (Joonis 4).



Joonis 3. Sildprinter Tallinna Tehnikakõrgkoolis [autori foto]



Joonis 4. Tootja mobiilne printer [5]

Selles peatükis käsitletakse nende kahe printeri tugevusi ja nõrkusi. Et oleks lihtsam jälgida siis allpool on välja toodud tabel (Tabel 1).

Tabel 1. Sildprinter ja mobiilse printeri võrdlus

Sildprinter	Mobiilne printer
Piiratud ala ehitamiseks. Ehitada saab nii palju kui suur on printer	Piiramata ala ehitamiseks
Toimuvad lihtsamad printeri liigutused	Robot-käsi teeb keerulisemaid liigutusi
Montaaž ja demontaaž võtab aega	Masinat on kergem valmis seada
Masina komponente on lihtsam hooldada	Masina keerukuse pärast on raskem komponente hooldada
Piiratud printimise ala puhul on lihtsam rajada ohutuse perimeetrit	Piiramata printimise ala puhul on ohutuse perimeeter fikseerimata
Halva maastiku puhul on raskem printerit üles seada	Halva maastiku puhul on lihtsam üles seada
Paigal	Mobiilne

Sildprinter saab oma ülesehituselt printida ainult sellel alal, kuhu selle raam ulatub. Samas mobiilne printer saab liikuda vabalt ringi ja ei ole liikumise piiranguid. Mobiilsel printeril on robot-käel kõrguse ja kauguse piirang. Liigutuste poolest on sildprinteril lihtsamad liigutused. Mobiilsel printeril on liigutused keerukamad ja tal on rohkem võimalusi. Sildprinteril võtab ülesseadmine ja ümbertõstmine rohkem aega, kuna masin ei ole mobiilne. [6]

Printimise ajal määratakse ära ka ohutuse perimeeter. Sildprinteril puhul kergem seda määrata, sest printer prindib koha peal ja nii suures ulatuses kui raam ise ulatub, määratakse ohutuse perimeeter. Mobiilse printeri puhul on seda raskem määrata, kuna ta liigub ringi. Kõige lihtsam variant, mobiilse printeri puhul, oleks määrata ära ehituse tsoon ja selle järgi määrata ohutuse perimeeter.

1.3 Mobiilse 3D-printeri vajalikkus

Tehnoloogia on kiiresti arenev ning iga uue sammuga saadakse juurde rohkem võimalusi. Uus printimise tehnoloogia võimaldab uusi lahendusi. Järgnevas peatükis tuuakse välja eelised ja puudused võrreldes tavaliste betoonitöödega.

1.3.1 Eelised ja puudused võrreldes tavaliste betoonitöödega

Kõige olulisem ressurss ehitusel hetkel on aeg. Seni on betoonitööd nõudnud märkimisväärselt aega ja ressursi. Printeri eelis on kiirus. Esiteks ei ole vaja kasutada raketisi ja suurt tööjõudu, mis võimaldab säästa aega. Printer võib printida kogu ööpäeva, mis tähendab seda, et automaatne ehitamine ei piirdu ainult tavapärase tööajaga. [7]

Võimalus on, et hoone või rajatise üldine maksumus väheneb. Betooni printimisel, nagu eelnevalt mainitud, ei ole vaja kasutada raketisi ja nendega seonduvad tööd jäävad ära. Sellega võib väheneda maksumus. Printimisel tekib vähem jäätmeid, mistõttu selles osas saab säästa ja tehnoloogia on keskkonnasõbralikum. [7]

Uute 3D-printimise tehnoloogiatega on potentsiaal vähendada süsihappegaasi eraldumist ehitise püstitamisel. Tavaliste betoonitööde puhul jäetakse kliimale jälg alates tööde ettevalmistusest kuni ehitise lõpetamiseni. Kogu protsess, mis toimub ehitusplatsil, tekitab süsihappegaasi emissioone. 3D-printimisega on võimalik kasutada vähem betooni, mis võib tagada hea vastupidavuse ning kvaliteedi.

Printimisel võib ehitise või rajatise tugevus minna paremaks. Nende omadusi on võimalik kujundada nii, et nad pakuksid samaväärset tugevust ja vastupidavust. See on oluline kui tegu on nõudliku keskkonnaga, näiteks mereäärsel alal või väga tormises keskkonnas. [7]

3D-printer loob uued disainivõimalused. Võimalik on printida keerulisi kujundeid ja sirgeid vastavalt soovile. Selline arhitektuuriline uuendus ei pruugi mõjutada väga palju hinda. 3D-printeriga printimine võimaldab ruumi paremini ära kasutada ja sellel ei ole negatiivset mõju konstruktsiooni terviklikkusele. [7]

Enamus eeliseid, mida eelpool mainiti 3D-printimise kohta on tavaliste betoonitööde puudused.

3D-printimisel on ka mõned puudused. Esiteks on väga väike eksimise tolerant. Segu kivistub väga kiiresti. Kui segu koostises on midagi valesti, siis võib olla tulemuseks segu liiga kiire kivilinemine. Segu võib kivilineda juba masinas, enne kui see välja jõuab. Hoonel või rajatisel peavad olema väga täpsed ja kindlad parameetrid, mis võib osutuda probleemiks. Segu kivistub kiiresti ja eksimuse tolerant on väike. Valesti printides on vaja kivilinenud segu ära likvideerida ja tehtud töö uuesti teha. [7]

Teine probleem sildprinteril puhul võib olla piirang kõrgemat hoonet printida. See sõltub tootja poolt valmistatud sildprinteril suurusest. Printer on hetkel kallid, kuna tegemist on uue tehnoloogiaga. Võimalus on, et hind läheb ajaga odavamaks. [7]

Viimaseks punktiks on hoone või rajatise välimus. Kuna printer printib kihtide kaupa, siis selle tulemusel jäävad näha jooned (Joonis 5). Printer annab unikaalse ja ilusa välimuse ning siledaks viimistlemine võib minna kalliks maksma. [7]



Joonis 5. Prinditud loss [8]

1.4 Prinditavad hooned ja rajatised

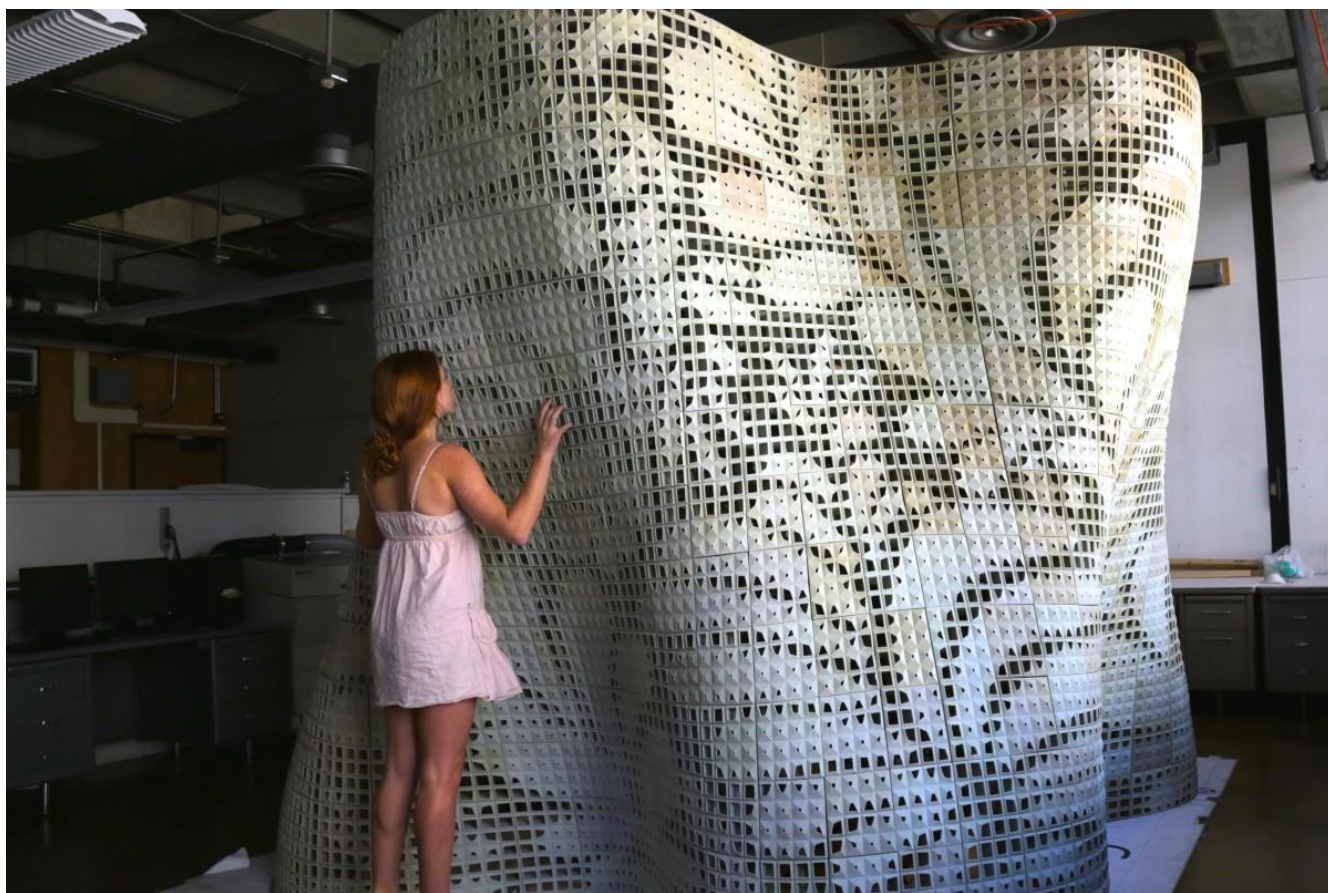
Tänapäeval prinditakse nii rajatise kui ka eluhooneid. Näiteks Texase osariigis prinditi elamiskõlblikud majad (Joonis 6). Shanghais prinditi sild (Joonis 7). Berkeley teadlased printisid uue arhitektuurse kujundusega rajatise (Joonis 8). Prinditud on kahekordseid eluhooneid.



Joonis 6. Prinditud elamiskõlblik maja Texases [9]



Joonis 7. Shanghai prinditud sild [10]



Joonis 8. 3D-prinditud rajatis [11]

1.4.1 Ehitise või rajatise kvaliteet, gabariidid ja valmimise kiirus.

3D-printeriga on võimalus tagada traditsioonilise betooni tehnoloogiaga samaväärne kvaliteet. Ehitise pind võib jääda teistsuguse viimistlusega võrreldes tavabetoneerimise puhul saadud pinnaga. Selline tehnoloogia võib anda võimalusi, et ehitis oleks omanäolisema välimusega aga samas vastupidav. Gabariidid sõltuvad printerist. Hetkel on maailmas leiutatud erinevaid sildprintereid ja mobiilseid printereid. Valmimise kiirus sõltub printerist ja kuidas meeskond seda opereerib, milline on segu jne. Kui võtta väiksem elumaja, siis eeldatav valmimise kiirus võib olla 24-48 tundi.

2 ÜLEVAADE TEHTUD TÖÖDEST TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO LIS

2.1 Erinevad prinditud elemendid ja segud

Tallinna Tehnikakõrgkoolis on katsetama hakatud alates 25. märtsist 2019. Prinditud on erinevaid kujundeid erinevate segudega (Joonis 9). All on välja toodud tabel, mis näitab, milline oli katsekeha, mis seguga prinditi ja mis kuupäeval (Tabel 2). Mõningaid elemente prinditi mitu korda erineva mõõduga ja erineva seguga. Näiteks ristküliku kujulist või ruudu kujulist kasti prinditi mitmeid kordi erinevate segudega ja erineva mõõduga. See käib ka teiste elementide kohta. Kasutati erinevaid TTÜ poolt välja töötatud segusid. TTÜ segude hulka kuulusid näiteks kiiresti kivinev segu ning erinevate lisandite kombineerimisel saadud segud. Lisandite all on mõeldud klaasliiva, fiiber lisandeid, peenliiva ja plastifikaatoreid.

Tabel 2. Prinditud elemendid ja segud

Element	Segu	Kuupäev
Sillus	WEBER EXM 731	25.03.2019
Püramiid ja koonus	WEBER EXM 731	15.04.2019
Ristkülik	MIRA 5100	01.11.2019
Ruut	MIRA 6810	25.10.2019
Silinder 1	WEBER EXM 731	18.09.2020
Silinder 2	TTÜ segu klaasi ja fiibriga	18.09.2020
Tala, kus on sõrestik sees 100x30 cm	WEBER EXM 731	25.09.2020
Ruut 50x50 cm	WEBER ESL	25.09.2021
Kaitseväge laskepesa	WEBER ESL (C33/40-4)	09.10.2020
Kaar, kus on sõrestik sees	WEBER ESL (C33/40-4)	30.10.2020
Tala, kus on sõrestik sees 200x30 cm + armatuur d = 6 mm	WEBER ESL (C33/40-4)	13.11.2020

Mõned katsekehad, mis prinditi, viidi purustamiskatsetele. Segu konsistents oli hoolikalt läbi mõeldud. See tähendab – vesi oli ära mõõdetud, segu oli ära kaalutud. Printimise ajal katsetati segu eraldi raputuslaual, mõõdeti koonuse vajumist ja õhu sisaldust.



Joonis 9. Erinevad printitud elemendid [autori foto]

2.2 Printimise arendus

Printimise tarkvarale tehti uuendus 8. novembril 2019 viimati. Sünkroniseeritakse pumbasüsteemi, printeri kiirust, printeri juhtimist ja segu konsistentsi.

Probleemid on olnud järgmised:

- 1) segu liiga vedel või tahke,
- 2) printer prindib liiga kiiresti või aeglaselt,
- 3) pumba tootlikus on liiga väike või suur,
- 4) printer prindib valel kõrgusel,
- 5) ebakõlad printeri, pumba ja segu vahel.

Kõiki neid parameetreid on katsetamiste tulemusel korrigeeritud ja omavahel paremini toimima saadud. Katsetamiste käigus on teada saadud kui suur peaks olema vee ja kuivsegu konsistents ning milliseid lisandeid oleks vaja doseerida. Uuritud on liikmete tööfunktsioone meeskonnas ning on paika pandud vastavad ülesanded.

2.3 Laskepesade printimine

Laskepesade printimine oli üks olulisemaid arendusi. Kogu töö põhjus oli teha ära eeltöö kaitseväge laskepesade printimise jaoks. Üks eesmärkidest oli printida laskepesad, et pioneerid saaksid hiljem neid lõhata vastupidavuse katsetamise eesmärgil. Teine eesmärk oli printida laskepesa, mis kaitseb automaatset sihtmärki. Laskepesa peab olema konstruktsiooni poolest piisavalt tugev, et võtta vastu nii väiksema relva kuule kui ka kuulipilduri kuule. Tuleviku visioon eeldab, et mobiilne printer sõidab platsile ja suudab printida kiirelt laskepesasid. Katsetamiste käigus selgusid tegurid, mis puudutavad konstruktsiooni vastupidavust ja segu koostist. Üldiselt oli töökorraldus laskepesade printimise ajal sama nagu kõikide teiste elementide puhul. Kooskõlastati sildprinteritarkvara töö ja segu koostis, et tulevikus saaks pesasid võimalikult vähese inimese sekkumisega valmistada. [12]

2.3.1 Konstruktsiooni printimine ja vastupidavuse katsetamine

Laskepesa konstruktsiooni peamine eesmärk oli tagada tugev vastupidavus kuuli kokkupõrke mõjule ja stabiilsus. Katsetuste tulemusel tehti järeldus, et laskepesal peab olema sein kahekihiline ja vorm ümar. Ümar vorm valiti põhjusel, et kuul põrkaks eemale kui laskepesa saab tabamuse. Oli erinevaid variante ja täiendusi, mis tugevdasid konstruktsiooni. Näiteks kahe seina vaheline ala sõrestikuga (Joonis 10), kandiline ilma sõrestikuta koos alusega (Joonis 11) ja vahepealse kujuga (Joonis 12).



Joonis 10. Sõrestikuga laskepesa [autori foto]

Täiendavaks tugevuseks valatakse saepuru või liiva sektoritesse. Sellise ülesehituse mõte on, et kui kuul purustab ühe nendest sektoritest ja liiv voolab välja, siis on teised sektorid veel terved ja täidetud seadme kaitsmiseks. [12]



Joonis 11. Kandiline laskepesa koos alusega [autori foto]



Joonis 12. Külgedelt nõgus laskepesa [12]

Kõige stabiilsem ja vastupidavam variant osutus sõrestikuga laskepesa, mis on täidetud liiva või saepuruga. Konstruktsioon ei sisalda täiendavat armatuuri.

2.3.2 Erinevad lisandid segus ja nende mõju

Katsetati erinevaid lisandeid. Peamised olid klaasgraanulid läbimõõduga 1 mm ja fiiber. Esmalt katsetati ainult klaasgraanulitega, mida lisati erinevate kogustega: 10, 20 ja 30 protsenti. Laskmistel tulistati 5,53 mm ja 7,62 mm kuule laskepesade pihta. Purunemine oluliselt erines tavalise betooni purunemisest peale klaasgraanulite lisamist. Konstruktsioon oli vastupidavam ja ei tekkinud märkimisväärsed mõrasid ning vähem kilde lendas välja kui kuul tabas. Ainult fiibriga prinditud katsekehadel tõusis vastupidavus kuulile. [12]

Hiljem kombineeriti mõlemat lisandit ja selgus, et see andis parima tulemuse. Fiiber tõstis üldiselt vastupidavust, et kuul ei läbiks konstruktsiooni. Klaasgraanulid tegid konstruktsiooni vähem hapramaks. [12]

3 INTERVJUUD PRINTERIT OPEREERIVA MEESKONNAGA

3.1 Üldine

Küsitluste eesmärgiks oli koguda täiendavat infot mobiilse printeri kohta. Info kogumise jaoks küsitleti meeskonna liikmeid. Järgmisena tuuakse välja küsimused, mis esitati ja antakse kokkuvõttev vastus nendele.

3.1.1 Miks on vaja mobiilset 3D printerit? Kuidas mõjutab kvaliteeti? Eelised ja puudused võrreldes tavaliste betoonitöödega.

Mobiilne printer on vajalik siis kui hoone või rajatise mõõdud lähevad suureks ja enam ei ole mõistlik üles seada sildprinterit. Mobiilne printer on tõenäoliselt odavam ja keskkonnasõbralikum selles olukorras. Printimise vabadus on suurem ja liikumine toimub kiiremini ühest kohast teise. Mobiilse printeri puuduseks on tema tundlikkus ilmastikule ja stabiilsuse tagamine on keerulisem kui sildprinteril. [13]

3.1.2 Mida prinditakse?

3D-printeriga saab printida keerulisi üksikelemente ja selliseid hoone või rajatise osasid, millega ei sillata avasid. Samuti saab printida kaarjaid elemente ning geomeetrilisi kujundeid (ruut, riskülik, ring) kiiresti ja otse mudelist. Arendamise käigus testitakse tehnoloogia ja juhttarkvara koostööd ning ehitise osade fragmente. [13], [14]

3.1.3 Mis on printimise täpsus ja maksimaalne rajatise või ehitise suurus?

Mobiilse printeri puhul peab tagama sama või parema printeri pea täpsuse kui sildprinteril. Võib arvestada, et printimise täpsus võib jääda 0,5 mm piiresse. Teoreetiliselt ei ole rajatise või hoone maksimum suurust. Elementide printimisel ja hiljem neid ehitusel kasutada, piiranguid ei ole. Erand juhul võib saada piiranguks printimistöö kaitsmiseks mõeldud telgi või angaari mõõdud, mis takistab kõrgustesse minemist või masin võib olla liiga raske. [13], [14]

3.2 3D-printer oma olemuselt ja sellega seonduvad ülesanded

3.2.1 Kas võtta kasutusele sildprinter või mobiilne printer?

Isiklikult eelistati sildprinterit, mida on võimalik konteineris kohale vedada ja mis suudaks koha peal ka erielemente printida. Võimalus on ka mobiilsel printeril, millel on robot-käsi ning seda peeti samuti võimalikuks alternatiiviks. [13], [14]

3.2.2 Kuidas hooldada masinat? Kas sellel on eraldi hoolduskapp? Kuidas toimub varuosade järelteenindus?

Olemasolevate kogemuste põhjal võib järeldada, et kõige rohkem vajavad hooldust segur, betoonipump, torustik ja printer ise. Kaasas peab olema selge hooldusjuhend koos hooldusvälpadega ja mõningate kulumaterjalide varud nagu näiteks tihendid, rihtmad jne. Samuti oleks mõistlik kui on olemas info varuosade tarneaja kohta ning järelteenindus toimub selliselt, et masin oleks võimalik ühe nädala jooksul töökorda seada. Kulumaterjalid on standardsed. [13], [14]

3.2.3 Millistest komponentidest masin koosneb ja kas see on distantsilt juhitud?

Seni on masin olnud võrgust juhitud ja puldi integreerimine on lihtne. Masinal endal on vajalik segu ettevalmistamise- ja pumbasüsteem, mis võimaldab segu segamist automaatselt. Samal ajal toimub ka vee doseerimine automaatselt. Kaugjuhtimisega peaks saama muuta pumba tootlikust, lisatava vee kogust ja printimise kiirust. [13], [14]

3.2.4 Kus hoitakse kuivsegu platsil?

Kuivsegu hoitakse telgis või angaaris, kus printimistöid tehakse. Ruumis peavad olema tagatud sobivad sisekliima parameetrid ning kaitse sademete eest. Kõige tähtsamad parameetrid on ruumi temperatuur ja niiskus. Kuivsegude hoiustamise asukoht peab olema planeeritud nii, et kuivsegu saaks kiirelt ja automaatselt segurisse lisada. [13]

3.2.5 Kuidas vahetatakse masina komponente tulevikus?

Masina komponentide vahetusel ei pea kindlasti kogu masinat demonteerima. Algusest peale on olnud tähtis modulaarne komplekteerimine. Komponendi purunemisel on tehase poolt ettenähtud asendus

sellele. Lisakomponentide vahetus võiks toimuda mõne väiksema detailiga nagu näiteks printeri pea uuendus vms. [13], [14]

3.2.6 Kuidas doseeritakse lisandit segule?

Hetkel ei ole see veel lahendatud, kuid arvati, et välitingimustes ei oleks mõistlik katsetada lisandi doseerimist. Mõistlik on kasutada juba välja töötatud ja läbi proovitud kuivsegusid, milles on lisand olemas. Lisandi doseerimine printimise ajal peab olema hoolikalt läbi mõeldud ja teostatav. Võimalik oleks lisandit lisada printeri peas otse segule või pärast printimist prinditavale detailile. [13], [14]

3.2.7 Milline võiks olla minimaalne vajalik ruum masina tööks?

Konkreetsed mõõtmeid välja ei pakutud. Aga väideti, et ruumi laius võiks olla 3-4 meetrit ja pikkus 4-5 meetrit. Eeldusel, et robot-käe pikkus võib olla 1,8-2,0 meetrit. [13]

3.2.8 Kuidas integreeritakse pumpamis- ja segamisüksus?

Seda ei osatud tehniliselt kirjeldada. Küll aga on vajalik kogu pumpamis- ja segamisüksus automatiseerida suuremahuliste printimiste puhul. [13]

3.2.9 Mis on segu hind ja millised tehnilised näitajad on tootja enda segul?

Konkreetsset hinda ja tehnilisi näitajaid ei osatud pakkuda. Suuremahuliste printimistööde juures on segu hind oluline tegur. Kallima segu hind võib ulatuda kuni 6 000 eurot tonni kohta ja sellega oleks mõistlik printida väiksemaid arhitektuurilisi elemente. Suuremahuliste printimistööde puhul oleks mõistlik uurida sellises hinnaklassis segude kasutamise võimalusi, mis on võrreldavad tavaliste kuivsegudega. [13]

3.3 Ilmastik

3.3.1 Kuidas tuleb toime masin halva ilmaga ja maastikuga? Printimine väga külma või soojaga.

Halva ilma kaitseks pakuti välja telgi või angaari võimalust, kus on võimalik tagada õiged tingimused. Probleemiks ei ole ainult madal või kõrge temperatuur, vaid tuul, sademed, päike ja tolmu. Samuti peab kaitsma masina elemente sademete eest. Lühiajaliselt on võimalik printida ka ilma angaari või telgita. Arvestades Eesti ilma siis suuremahulisemate tööde puhul on keeruline leida selline periood, kus on iga

päev ilus ilm. Maastikul liikumiseks eelistati roomikuid, sest nende erisurve pinnasele on palju väiksem kui ratsetega masinatel. Üldiselt peab plats olema korralikult ettevalmistatud ja kontrollitud. [13], [14]

3.3.2 Kuidas kaitsta ehitusmaterjale halva ilma eest?

Kaitseks pakuti telgi või angaari olemasolu platsil. Kui printimine toimub telgis või angaaris siis on võimalik kuivsegusid seal samas hoida. Võimalik on ka teine telk või angaar, kus on vastavad tingimused ehitusmaterjalide jaoks. Kuivsegu peab paiknema sellises kohas, et seda saaks kiirelt ja säästlikult segurisse suunata. [13]

3.3.3 Kuidas printida vihma ja tuulega?

Siin kohal pakuti välja telk või angaar. Otseses kontaktis välitingimustega ei ole kõige mõistlikum printida kui tahetakse tagada stabiilset keskkonda. [13]

3.3.4 Kuidas toimetatakse segu platsile?

Segu saabub platsile 20 kuni 25 kg kaaluvates kottides, mis sisestatakse segurisse. See sõltub ka sellest, milline on seguri ehitus. Transport platsile, ladustamine ja segurisse lisamine peab toimuma võimalikult väikese inimtööjõuga ja tolmuvabalt. [13]

3.3.5 Kas printer sõidab ise platsile või ta veetakse sinna?

Kõige paremaks variandiks peeti veokit, mis printeri platsile toimetab. Printer ise peab suutma sõita platsil madalal kiirusel ja ehitusplatsi tingimustes. [13]

3.4 Brigaadi koosseis ja ülesanded

3.4.1 Kuidas säilitada brigaadi mugavat keskkonda ja töövoolu?

Mugava keskkonna säilitamiseks kasutatakse telki või angaari. Töövoolu hoidmiseks on väga tähtis jaotada ära ülesanded ja leppida kokku kes mille eest vastutab. Eriolukorras käitumine kuulub samuti siia juurde. Eriolukorra alla kuulub näiteks masina rike, segu kivistumine masinas sees või viga juhtimistarkvaras. Suurt tähelepanu on vaja juhtida printimisala valgustusele, ohutusele, müra- ja tolmutokestamisele.

3.4.2 Mitu liiget on brigaadis? Mis oleks eesmärk?

Üldine eesmärk on hoida meeskonna liikmete arvu madalana. Liikmete arv võiks piirduda 3 inimesega. Esimene mees vastutaks masina hoolduse, ettevalmistus-lõpetustööde ja segu ettekande eest. Teine mees vastutab tarkavara ja prinditava mudeli eest ning samuti ka juhib printeri tööd. Kolmas mees juhib kogu protsessi. Ta vastutab telgi või angaari püstitamise, transpordi ja kuivsegude tellimise, kvaliteedi hindamise eest. Selline ülesannete jaotus eeldab automaatset segu segamist, töökindlat masinat ja toimivat tarkvara. [13]

3.4.3 Mida sisaldab meeskonna väljaõpe?

Meeskonna väljaõpe sisaldab praktikas kasutatavate operatsioonide tutvustamist ja läbi harjutamist. Harjutamine toimub iseseisvalt laboritingimustes. Samuti oleks vajalik koolitada varuliikmeid juhul kui põhiliikmetest keegi haigestub või ei saa kohal olla teatud põhjustel. Tuleks koostada ka lühijuhend, kuidas masinaga ohutult tööd teha ja eriolukorra tekkimise lahenduseks.

3.5 Tarkvara lahendused

3.5.1 Milliseid tarkvarasid kasutatakse? Miks?

Tarkvara peab olema üldlevinud ning lihtsasti kasutatav ja õpitav inseneridele, kes seda kasutavad. Hetkel kasutatav operatsioonisüsteemina on Windows 7 Pro kontrollervuti. Tegemist on standard sülearvuti riistvaraga, mida on lihtne hooldada ja vahetada. Printeri ja arvuti vaheliseks suhtluseks kasutatakse Repetieri tarkvara. Sisse ehitatud lõikurina kasutatakse programmi nimega Slicer. Slicer ise on väga kiiresti arenev ja parim variant, mida hetkel kasutada. Hetkel kasutatakse läbi Repetieri käsitsi või läbi teiste programmide tehtud g-goodi. Põhjuseks on see, kuna lõikur ehk Slicer töötab liiga piiratult ja sellega saab teha ainult lihtsamaid geomeetrilisi kujundeid. Eesmärk on kasutada nii palju kui võimalik vabavaralist riistvara ja tarkvara, et võimaldada edasisi arendusi nii teistele koolidele kui tulevastele kasutajatele. [14]

CAD programmina 3D-printimise maailmas eelistatakse pigem Rhino 3D programmi. See võimaldab erinevaid lähenemisi nii kujundamisele kui ka kujundamise automatiseerimisele. Mobiilse printeri tootja ise kasutab lõikurit, mis töötab otse Rhinos. Slicer on programm, mis teisendab digitaalsed 3D-mudelid printimisjuhisteks, et 3D-printer saaks nende järgi objekti printida. [14]

3.5.2 Tarkvara arenduse trendid.

Kõik oleneb tarkvarast. Hetkel arendatakse aktiivselt kiibi peal olevat juhttarkvara vastavalt riistvara nõudmistele ja ka kujundist g-koodi saamise osa. Hetkel puudub selles osas piisav *know how* ning see on oluline arendussuund.

3.5.3 Kui tihti on vaja tarkvara uuendada?

Iga kord kui tekib mõni probleem tarkvaras, on sellele ka lahendus kiiresti leitav. Tarkvara põhiparameetreid ei ole põhjust muuta. Ainult juhul kui tuleb välja mõni lahendamatu probleem.

3.5.4 Tarkvara kasutus mobiilsel printeril

Tootja kasutab CHYSEL tarkvara enda mudelite ehitamise jaoks. Programmis on võimalik määrata kihi paksus, laius ja printimise kiirus. Veel üks eelis sellel programmil, on meelde jätta kõik prinditud elemendid, mis on minevikus prinditud. Mobiilse printeri robot-käsi liigub kuue telje suunas. Tihtilugu tekib risk mõne muu tarkvaraga. Risk, et robot-käsi teeb midagi katki prinditud elementidest või kõrval olevatest asjadest. Seda võib juhtuda kui on vajadus midagi lisaks printida olemasolevale elemendile. Tänu CHYSEL tarkvarale liigub robot-käsi turvalisemalt ja ei tekita kahju. [15]

CHYSEL loob koodid, mille järgi hakatakse elementi printima. Teine tarkvara, millega juhitakse printerit ennast, kannab nime ARTYSAN. See programm muudab printeri opereerimise lihtsamaks. Lisaks kasutatakse ARTYSANi 3D-printimise statistika jälgimiseks. [15]

Erinevate elementide projekteerimise kiirendamiseks kasutatakse paljusid tarkvaratööriistu. Võimalik on kujundada elementide parameetreid, mis võimaldab printida üle 400 000 erineva kuju ja vormi. Lisaks on võimalik selliste tööriistadega kaardistada täiuslik tulevikumaja nii paigutuse kui ka mõõtude osas, mis põhinevad inimese käitumismudelitel. Pidevalt testitakse neid tööriistu mobiilse printeri tootja laborites ja töötatakse aktiivselt selle nimel, et need tööriistad saaksid tulevikus olla avalikud. [15]

4 MOBIILSE 3D-PRINTERI MASIN

Käesolev peatükk käsitleb detailsemalt, milline oleks eeldatav mobiilne 3D-printer. Antakse põgusalt ülevaade masina komponentidest ja tüübist. Kuidas käsitletakse segu platsil, kuidas masinat hooldatakse ja kuidas transporditakse.

4.1 Masina tüüp

Masin on mobiilne. Välimuselt on sarnane nagu eelpool välja toodud pildil (Joonis 4) – ratastel või lintidel robot-käega.

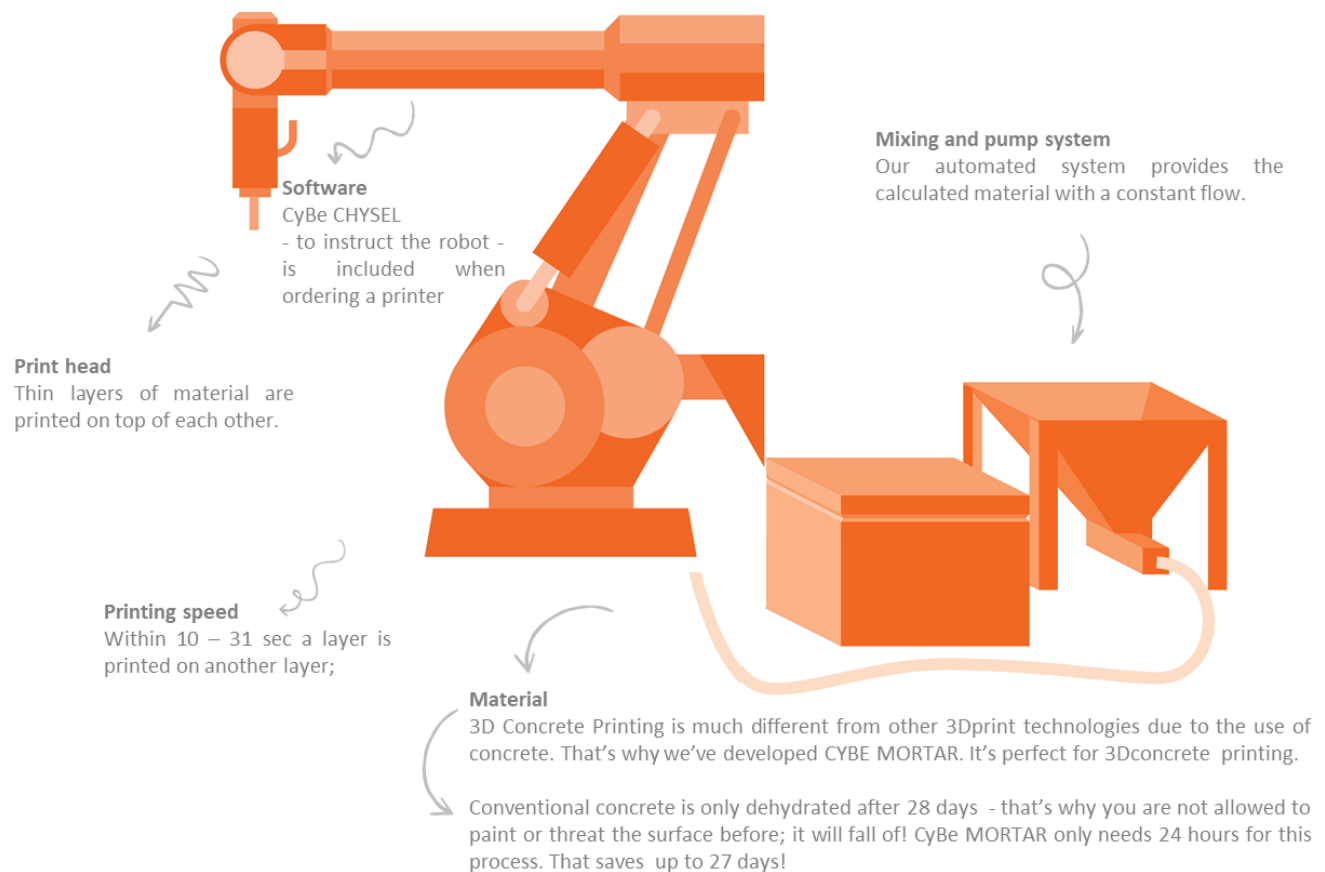
4.2 Masina hooldus

Masina hooldus peab toimuma lihtsalt. See tähendab, et masin käib moodulite kaupa lahti. Masina kuluosad on standardsed. Vajadusel on võimalik vahetada purunenud komponent ja tellida täpselt samasugune asemele ilma, et see kuidagi järgnevaid töid mõjutaks. [14]

Platsil on hoolduskapp. Hoolduskapp ei ole printeri küljes, sest see annab raskust juurde ja üleüldine liikumine on raskendatud. Väiksema tõrke puhul on võimalik hooldada masinat hoolduskapis olevate tööriistadega. Kui tekib mõni suurem tõrge, siis tuleb kohale kutsuda eraldi hooldusbrigaad. Peale printimist hooldatakse masin. Kõik tarvikud ja tööriistad on eraldi hoolduskapis olemas, millega saab printeri ära puhastada.

4.3 Masina komponentide ülevaade ja juhitavus

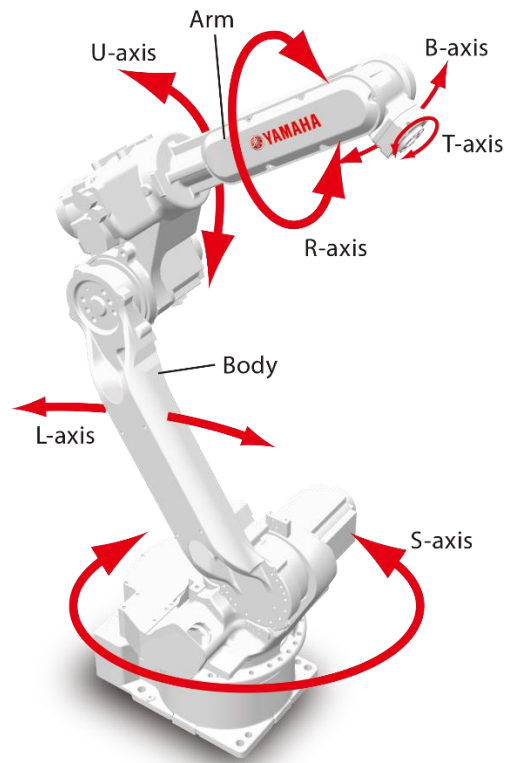
Masina komponentidest on kõige tähtsamad linnid, mille peal masin liigub, toetamise käpad, printeri pea ehk robot-käsi, betoonipump, segur, betooni voolik. Alloleval pildil on välja toodud põhimõtteline skeem, kuidas peaks süsteem tervikuna toimima (Joonis 13).



Joonis 13. Printeri skeem [16]

Betoonipump on kinnitatud arvuti juhitava liikumissüsteemi külge, mis jälgib täpselt betooni sadestumist. Segur ja pumbasüsteem on ühendatud printeriga ning segu tuleb mööda voolikut printeri pea kaudu välja. Printeri pea ehk robot-käsi (Joonis 15) saab liikuda kuue telje suunas sarnaselt Yamaha poolt valmistatud robot-käega (Joonis 14). [16]

Kui tegemist on halvema maastikuga siis printer toetab ennast tugijalgadele (Joonis 16) printimise ajaks, et ta oleks fikseeritud asendis. Voolik on vastava pikkusega, et segu jõuaks printerini. Masin liigub järgmise koha juurde lintide peal (Joonis 17). Pumba tootlikust ja printimise kiirust on võimalik juhtida puldiga.



6-axis robots

- S-axis: Rotate the body horizontally
- L-axis: Move the body forward/backward
- U-axis: Move the arm up/down
- R-axis: Rotate the arm
- B-axis: Move the tip of the arm up/down
- T-axis: Rotate the tip of the arm

Joonis 14. Yamaha robot-käsi [17]



Joonis 15. Robot-käsi [5]



Joonis 16. Printeri tugijalad [16]



Joonis 17. Printeri linnid, mille peal ta sõidab [16]

4.4 Segu käsitlemine platsil

Oluline kogu selle protsessi juures on segu käsitlemine. Segu peab olema piisavalt vedel, et voolaks hõlpsasti läbi vooliku. Valesti käsitlemise puhul on tagajärjeks segu kivistumine vooliku sees või trombi

teke. Samas peab segu olema piisavalt tahke, et prinditav ese laiali ei vajuks. Sinna juurde kuulub täpne koostisosade kaalumine ja mõõtmine ning kindlate lisandite doseerimine.

Printimine telgis või angaaris tagab vajaliku keskkonna. Seal saab kaitsta kuivsegusid, ehitusmaterjale ja seadmeid sademete eest. Segu segatakse koha peal, mitte ei transpordita ehitusplatsile. Värske segu pumbatakse otse voolikusse ja sealt kaudu printerisse. Kogu protsess toimub katte all.

Erandjuhul hea ilma korral või kui objekt asub sellises ilmavööndis, kus on peamiselt kuiv, siis ei ole telgi püstitamine vajalik.

4.5 3D-printeri transportimine

Mobiilse printeri objektile saamine toimub veoki abil. See tähendab, et printer laetakse veoki peale ja veok sõidab objektile. Printer ei sõida platsile, sest sellega kaasneb palju probleeme. Esiteks kui objekt on sadade kilomeetrite kaugusel siis ei ole see mõeldav. Teiseks probleemiks on printeri komponendid ja kütus, mis kulub, kui printer sõidab ise objektile. Et printer liigselt ei kuluks ja, et oleks ökonoomsem, siis veokiga kohale vedada on parim variant. Kui vaadata ajalist poolt siis kindlasti saab veoautoga sõites printeri kiiremini kohale kui ise sõidaks.

5 ILMASTIKUGA SEOTUD TAKISTUSED JA LAHENDUSED

Printimistööd toimuvad peamiselt õues. Sellega seoses on vaja arvestada ilmastikuga ja sellega kaasnevate probleemidega.

5.1 Halva ilmaga printimistööde teostamine

Kõik sõltub sellest kui halva ilmaga antud juhul on tegemist. Eelnevas peatükis, kus räägiti segu käsitlemisest, mainiti telgi kasutamist. Kui töö on tähtajaline ja printimistööd ei ole võimalik edasi lükata, siis tuleks kaaluda telgi ülesseadmist. Telgi katte all toimub printimine ja seal hoitakse ka segu valmistamiseks vajalikke koostisosasid. Telk ise peab olema piisavalt vastupidav tugevale tuulele ja vihmale.

5.1.1 Printimine külma ilmaga

Traditsiooniliste betoonitööde puhul on külma ilmaga töö teostamine raskendatud. Põhjuseks on segu aeglane kivinemine. Halvemal juhul võib segu jäässe minna ja hiljem sulades laguneda. Sama kehtib ka printimise puhul. Printimine $-1...-5$ °C kraadi juures võib segu tahenemine ulatuda kuni 19 tunnini. Printimisel on vajalik, et segu taheneks kiiresti ja jääks vajalikku vormi. Külma aeglustab segu tahenemist ja halvemal juhul jääb segu ära, mis hiljem sulades laguneb. [18]

Probleemile lahenduseks on olemas kaks varianti. Esiteks on võimalik muuta segu koostist. Lisada segu sisse sellised lisandid, mis kiirendavad segu tahenemist ja takistavad segu jäätumist külmal ilmal. Teiseks variandiks on traditsiooniline telk nagu tehakse tavaliste betoonitööde puhul. Telgis on võimalik soojapuhuritega saavutada stabiilne temperatuur, millega on võimalik printida.

5.1.2 Printimine kuuma ilmaga

Kuuma ilmaga printimisel võib segu tahenemine muutuda liiga kiireks. Vastupidiselt külma, võib

30-40 °C kraadi juures segu taheneda minutitega või tunniga. Liiga kiire tahenemise korral võib probleeme tekkida pumbasüsteemiga kui segu segatakse mikseris ja seejärel see printerisse suundub. Segu võib kivistuda juba voolikus sees. Prinditud elemendile tekivad praod ja kvaliteetset tulemust on keeruline saavutada.

Lahenduseks on lisandite lisamine, mis toimivad vastupidiselt külmalisandite puhul või telgis printimine, kus on võimalik saavutada kaitse otsese päikesekiirguse eest.

5.2 Printimine raskel maastikul

Mobiilsel printeril liikumisega väga palju raskusi ei teki, sest ta liigub lintide peal. Raskused võivad tekkida alles siis kui printer fikseerib ennast koha peale enne printimist. Fikseerimine tähendab seda, kui printer jääb seisma ja laseb tugijalad maha enne printimist. Kui tegemist on väga pehme maastikuga siis on vaja lisa toetust tugijalgadele. Muidu võivad tugijalad vajuda maa sisse ning printer kaotab stabiilsuse.

Prinditava rajatise või hoone jaoks on vaja eraldi valmistada ette plats. Printer ei saa printida ebatasasel pinnasel väga efektiivselt. Põhjuseks on see, et printer on programmeeritud printima tasasel pinnal. Ebatasasel maapinnal tekivad raskused.

5.3 Ehitusmaterjalide kaitse

Objektil peab olema kõik organiseeritud. Alates töötsoonist kuni kohani, kus hoida ehitusmaterjale. Ehitusmaterjalide jaoks on eraldi väike *pop-up* stiilis telk või mõni muu varjualune. See peab olema piisavalt vastupidav tuulele ja vihmale. Sisepääs on nii suur, et ehitusmaterjale oleks võimalik transportida sisse ja välja ilma takistusteta.

Üldiselt on objektil vajadus mitme telgi järgi. Näiteks üks nendest on printimise telk, kus toimub töö. Teine telk on ehitusmaterjalide telk. Kui ilm läheb vihmaseks, siis peab olema kuivsegude ja muude materjalide transport ühest telgist teise selline, et materjal ei märguks.

6 BRIGAADI KOOSSEIS

6.1 Tööülesannete jaotumine ja meeskonna liikmete arv

Hetkel on Tallinna Tehnikakõrgkoolis sildprinteriga töötamas neli inimest. Üks liige vastutab tarkvara ja printeri käsitlemise eest. Ta jälgib, et printer toimiks nii nagu planeeritud, hooldab printerit ning valmistab ette mudeli vastava programmiga, mida hiljem prinditakse. Teine liige vastutab segu eest. Ta jälgib, et õige segu jookseks printerisse ja et plats oleks puhas kui printer hakkab printima. Kolmas liige on pumbasüsteemi juures. Ta jälgib, et pump oleks õige tootlikkusega ja, et segu jookseks ilusti läbi vooliku. Neljas mees on juht, kes jälgib kogu protsessi. Ta vaatab, et kõik sujuks plaani järgi.

Mobiilsel printeril on ülesannete jaotumine sarnane. Väljas kasutatakse telki või angaari, kus sees teostatakse printimistöid. Kui telgi ülespanek osutub ajaliselt mahukaks ja keeruliseks siis on vajadus võtta lisa tööjõudu. Lisa tööjõud ei teeninda printerit. Nad aitavad ainult eeltöid teha, et printimise jaoks oleks tööala tagatud. Ehitusmaterjalide hoiustamine on kas samas telgis või on vajadus püstitada eraldi telk. Kõik sõltub prinditava hoone või rajatise suurusest.

Eesmärgiks on võimalikult palju tegevusi automatiseerida ja hoida liikmete arvu madalana. Optimaalne oleks kui printeriga töötab kolm inimest. Esimene töötaja vastutab masina hoolduse, ettevalmistus- lõpetustööde ja segu ettekande eest. Teine töötaja juhib printeri tööd ning vastutab tarkvaraga seotud probleemide ja samuti ka prinditava mudeli eest. Kolmas töötaja juhib kogu protsessi, kes vastutab telgi püstitamise, kvaliteedi hindamise ning transpordi ja kuivsegude tellimise eest. Ülesannete jaotus eeldab, et segu segamine on automaatne ning printer ja tarkvara peavad olema töökindlad. [13]

Tuleviku eesmärgina on mõistlik seada üks inimene printimistööde peale. See tähendab, et palju tegevusi on automatiseeritud. Näiteks vee lisamine ja kuivsegu lisamine segurisse. Tehnoloogia on juba nii kaugele arenenud, et enam ei teki tüüpilisi probleeme.

6.2 Mugav töökeskkond ja töövoolu hoidmine

Nagu on juba eelnevalt mainitud siis ainuke variant, kuidas välitingimustes mugavat keskkonda saavutada, on püstitada telk või angaar. Seal on võimalik saavutada vastavad tingimused printimise jaoks ja ka liikmetel mugavam tööd teha. Töövoolu hoidmiseks on vaja selgelt ja konkreetselt ära selgitada igale liikmele vastavad ülesanded ja kokku leppida erinevad probleemkohad. [13]

Eriolukorrad on vaja selgeks teha juba enne kui nad juhtuvad. See tähendab, et segu kivistumise korral vooliku sees on vaja välja selgitada, kus on vastavad tööriistad ja kuidas tegutseda. See nõuab läbi harjutamist. Antud reegel kehtib iga eriolukorra jaoks. Kindlasti on vajadus koostada vastavad ohutusjuhendid, mille järgi saab tegutseda. Ohutusjuhendid kehtivad ka üldise printimistö, mitte ainult eriolukordade jaoks. Mugavale keskkonnale aitab kaasa piisav valgustus, tolumumaskid, kaitseprillid, kõrvaklapid ja õiged tööriided.

6.3 Meeskonna väljaõpe

Väljaõpe näeb ette, et iga meeskonnaliige peab tutvuma tööga ja harjutama erinevates situatsioonides käituma. Sinna hulka kuulub kogu printimise protsessi läbi harjutamine. Tõenäoliselt toimub harjutamine laboritingimustes. Väljaõpe kehtib ka varuliikmetele. Varuliikmed on need, kes asendavad põhiliikmeid haigestumise või muu probleemi korral. [13]

7 LÄHTEÜLESANNE SEADME TOOTJALE

Järgnevalt on välja toodud lähteülesande punktid:

- 1) Prinditud elemendi kvaliteedi ja vastupidavuse kirjeldus. Millist pinnakvaliteeti on võimalik saavutada?
- 2) Tuua välja printeri printimiskiiruse vahemik.
- 3) Tuua välja pumba tootlikkuse maksimaalne ja minimaalne kiirus.
- 4) Tuua välja minimaalse ruumi suurus printimistööde jaoks.
- 5) Mobiilse printeri maksimaalse printimise kõrguse ja kaugus.
- 6) Kuidas toimub seadme positsioneerimine erinevate tööpositsioonide puhul?
- 7) Printer peab võimaldama erinevate segude printimist. Millised on tootja piirangud?
- 8) Tuua välja tootja enda segu hind ja kirjeldada segu tehnilisi näitajaid
- 9) Printimistööde jaoks vajalike tingimuste kirjeldus (temperatuur, sademed, tuuletingimused)
- 10) Kuidas toimub lisandite doseerimine?
- 11) Milline on prinditud elemendi täpsus?
- 12) Tuua välja prinditava rajatise või hoone maksimaalsed gabariidid
- 13) Kuidas transportida printer platsile ja kui kiiresti sõidab printer?
- 14) Kuidas toimub masina hooldus? Miilise intervalliga ja millised toimingud on vajalikud.
- 15) Kas printer on kaugjuhitav?
- 16) Kirjeldada printeri ülesseadmist ja kokku panemist
- 17) Kus hoitakse segu komponente?
- 18) Kas on võimalik tulevikus vahetada masina komponente? See on arenduse seisukohalt oluline.
- 19) Kuidas integreeritakse pumpamis- ja segamisüksus?
- 20) Kuidas saab masinat stabiliseerida? Ebatasaste pindade puhul on see vajalik.
- 21) Mis on eeldused pinnasele, et masin saaks printida?
- 22) Kuidas on korraldatud ummistuste avastamine ja eemaldamine?
- 23) Kuidas on korraldatud varuosad ja järelteenindus?
- 24) Kus paiknevad hoolduse tarvikud ja erinevad varuosad?
- 25) Millised on masina kuluosad ja millise intervalliga tuleks neid vahetada?
- 26) Kas on võimalik muuta otsikute kuju ja läbilaskevõimet?
- 27) Tuua välja teleskoop-jalgade kõrgus

- 28) Mis on ühe prinditud kihi laius ja kõrgus?
- 29) Kirjeldada garantii tingimusi
- 30) Kas tulevikus on võimalik vahetada robot-kätt, pumpa ja segurit?
- 31) Mis on masina ohutusvarustus? Seal hulgas erinevad piirajad
- 32) Millised on erinevad tarkvara lahendused ja kuidas uuendused mõjutavad printeri komponentide tööd?

KOKKUVÕTE

Hetkel on 3D-printimise tehnoloogia väga kiiresti kasvav ja arenev. Tarkvaralahendused pidevalt uuenevad ja tullakse välja uute ideedega, kuidas on võimalik veelgi efektiivsemalt printimistööd korraldada. 3D-betooni printimine on kiires arengufaasis.

Tulevikuks on võimalik prognoosida printimise tehnoloogia laialdast levikut ehitusturul. Hetkel otsitakse, kuidas oleks kõige kiirem ja optimaalsem ehitada hooneid ja rajatisi 3D-printimise tehnoloogia abil. Antud lõputöös on tehtud võrdlus mobiilse printeri ja sildprinterit kohta ja toodud välja nende eelised ja puudused. Kokkuvõttes võib öelda, et mobiilsel 3D-printeril on palju eeliseid võrreldes tavaliste betoonitöödega. Sellise tehnoloogiaga hoone või rajatise kvaliteet ja tugevus võib olla võrdväärne traditsiooniliselt ehitatud ehitisega. See annab juurde uusi arhitektuurilisi võimalusi ning on kiirem.

Suurt rolli mängib segu koostis ja printeri töökindlus. Segu parameetritest sõltuvalt võivad teatud asjaolud olla takistuseks, et suurema mahulisemaid projekte printida. Segu on kindlasti see kitsaskoht, mille kallal on vaja veel palju tööd teha. Kaitseks halbade ilmastikuolude eest tuleks kasutada angaari või telki, sest seal on ainuke võimalus saavutada ideaalsed tingimused.

Lõputöö käigus koostati lähteülesanne, mille alusel hangitakse mobiilne printer. Mobiilne printer on kompaktne ja teda on mugav transportida objektile. Teoreetiliselt tuleb printeri opereerimise meeskonna suurus 2-3 töolist. Katsetused hakkavad toimuma laboritingimustes. Seni on Tallinna Tehnikakõrgkoolis tehtud katseid erinevate segudega kasutades sildprinterit. Mobiilse printeri puhul saab teha samalaadseid katseid ning tekivad ka uued võimalused tehnoloogia edasi arendamiseks.

SUMMARY

Mobile 3D concrete printer

Currently, 3D printing technology is growing and evolving very fast. Software solutions are constantly being updated, and new ideas are coming up on how to organize print jobs even more efficiently. 3D printing is still in its infancy and has not gone to great heights in building construction.

In the future, printing technology will have conquered the majority of the construction market. We are always looking for the fastest and most optimal way to build buildings and facilities. 3D printing technology is definitely the cornerstone of this. The comparison made between the mobile printer and the bridge printer revealed that they both have their advantages and disadvantages. In conclusion, it is certain that a mobile 3D printer has many advantages over conventional concrete work. The quality and strength of a building or structure with such technology do not change but rather adds new architectural possibilities and are faster.

The composition of the mixture and the reliability of the printer play an important role. Depending on the mixture, certain physical laws may be an obstacle to larger projects. The mixture is certainly a bottleneck that still needs a lot of work. A hangar or tent is used for weather protection, as it is the only way to achieve ideal conditions.

In the course of the graduation thesis, the initial task was compiled, on the basis of which a new mobile printer will be procured. The mobile printer is compact and convenient to transport to the site. Theoretically, the size of the printer's operating team should be 2-3 men. The tests will start under laboratory conditions. So far, experiments with different mixtures have been performed at Tallinn University of Technology using a bridge printer. For a mobile printer, one can perform similar experiments and go on to open new doors.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Youtube, „The history of concrete,“ 20. aprill, 2020. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=5nt9vmrj_8k. [Kasutatud 21. märts, 2021].
- [2] Wikipedia, „Joseph Aspdin,“ 11. märts, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Aspdin. [Kasutatud 21. märts, 2021].
- [3] Wikipedia, „Construction 3D printing,“ 8. jaanuar, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing#History. [Kasutatud 17. märts, 2021].
- [4] T. Boissonneault, „PERI Group signs on as distributor for COBOD construction 3D printers,“ 2. aprill, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.3dprintingmedia.network/peri-group-distributor-cobod-3d-printers/>. [Kasutatud 27 märts, 2021].
- [5] CyBe, „3DPrint,“ 16. detsember, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://3dprint.com/158972/cybe-mobile-3d-concrete-printer/>. [Kasutatud 22. märts, 2021].
- [6] Twente Additive Manufacturing B.V., „Gantry 3D Printer,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.twente-am.com/what-is-architectural-3d-printing/gantry-concrete-3d-printer>. [Kasutatud 18. märts, 2021].
- [7] Concrete Renovations, „The Benefits of 3D Printing from Concrete,“ 26. mai, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.concreterenovations.co.uk/news/the-benefits-of-3d-printing-from-concrete/>. [Kasutatud 20. märts, 2021].
- [8] A. Rudenko, „3D Concrete House Printer,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.totalkustom.com/3d-concrete-printers.html>. [Kasutatud 20. märts, 2021].
- [9] Singularity Hub, „This 3D Printed House Goes Up in a Day for Under \$10,000,“ 18. märts, 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://singularityhub.com/2018/03/18/this-3d-printed-house-goes-up-in-a-day-for-under-10000/>. [Kasutatud 20. märts, 2021].
- [10] CNN, „Shanghai opens world's longest 3D-printed concrete bridge,“ 24. jaanuar, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://edition.cnn.com/style/article/shanghai-3d-printed-bridge-scli-intl/index.html>. [Kasutatud 20. märts, 2021].

- [11] New Atlas, „Berkeley researchers pioneer new powder-based concrete 3D printing technique,“ 12. märts, 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://newatlas.com/berkeley-researchers-pioneer-powder-based-concrete-3d-printing/36515/>. [Kasutatud 20 märts, 2021].
- [12] A. Liblik, Interviewee, *Laskepesad*. [Intervjuu]. 8. aprill, 2021.
- [13] L. Peetrimägi, Interviewee, *3D-printimine*. [Intervjuu]. 11. märts, 2021.
- [14] G. Gerretz, Interviewee, *3D-printer*. [Intervjuu]. 12. märts, 2021.
- [15] CyBe, „Software,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://cybe.eu/technology/software/>. [Kasutatud 10. aprill, 2021].
- [16] K. Stevenson, „CyBe’s Construction 3D Printers Are Mobile,“ 10. august, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/8/10/cybes-construction-3d-printers-are-mobile>. [Kasutatud 23. märts, 2021].
- [17] YRG Robotics, „YA Series: 6 Axis Type,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <http://yrgautomation.com/products/details/?product=6-axis>. [Kasutatud 17. aprill, 2021].
- [18] A. Gardere, „Effect of Cold Temperature on 3D Printed Concrete,“ 30. aprill, 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=IB4VqHXBwOs&t=447s>. [Kasutatud 20. märts, 2021].
- [19] B. Carr, „Introduction to 3D printed concrete,“ Youtube, 8. juuli, 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=-Csy2e1B2v0>. [Kasutatud 20. märts, 2021].