



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**KLAASKERGÄITEMATERJALIGA 3D
PRINTIMISBETOONI KOOSTISE
VÄLJATÖÖTAMINE**

**DEVELOPMENT OF A 3D PRINTING CONCRETE
COMPOSITION WITH GLASS AGGREGATE MATERIAL**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Tairi Sepp

Üliõpilaskood: 182305EAEI

Juhendaja: Tanel Tuisk

Kaasjuhendaja: Kadri- Ann Kertsmik

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.

11.mai 2023

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

„.....“ 20.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

„.....“ :20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Tairi Sepp**,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Klaaskergetäitematerjaliga 3D printimisbetooni koostise väljatöötamine**, mille juhendaja on Tanel Tuisk
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

.....(kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **TAIRI SEPP**

Üliõpilaskood **182305**
EAEI

Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peeriala: Ehitusmajandus ja juhtimine

Lõputöö teema:

KLAASKERGTÄITEMATERJALIGA 3D PRINTIMISBETOONI KOOSTISE VÄLJATÖÖTAMINE

Development of a 3D printing concrete composition with glass aggregate material

Juhendaja: **Tanel Tuisk**
Kadri-Ann Kertsmik

tanel.tuisk@taltech.ee kadri-
ann.kertsmik@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja
Perekonnanimi

Kontakt (e-post või
telefon)

Allkiri ja kuupäev

Mattias Põldaru

mattias.poldaru@taltech.ee

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida klassist kergtäitematerjali mõju 3D prinditud betooni omadustele
2. Töötada välja baasretsept klaasist kergtäitematerjaliga 3D prinditud betooni koostisele
3. Uurida klaaskergtäitematerjali kasutamise mõju süsiniku jalajäljele

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Kirjandusega tutvumine ja katsemetoodika läbitöötamine	01.01.2023
2. Katsemetoodika läbitöötamine	16.12.2023
3. Kuivsegude valmistus	31.01.2023
4. Katsete teostamine	03.05.2023
5. Katsetulemuste analüüs ja lõputöö kirjutamine	08.05.2023
6.	....
	16.05.2023
Kokkuvõtte eesti keeles	16.05.2023
Kokkuvõtte inglise keeles	....

Lõputööde ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

11.05.2023

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

Kirjeldus	Tähtaeg
1	10.05.2023
2	10.05.2023
3	10.05.2023
4	10.05.2023
5	10.05.2023

Lõputöö esitamise tähtaeg:

15. mai 2023

Lõputöö ülesanne välja antud: 16.11.2022

Juhendaja:

Tanel Tuisk

Ülesande vastu võtnud:

Tairi Sepp

Avalikustamise piirangu
tingimused:

puuduvad

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON.....	2
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	3
SISUKORD	6
EESSÕNA.....	8
TABELITE LOETELU	9
JOONISTE LOETELU.....	10
SISSEJUHATUS	12
1. Põhiosa.....	14
1.1 Printbetooni koostisosad	14
1.1.1 Sideaine	14
1.1.2 Täitematerjal	18
1.1.3 Keemilised lisandid.....	27
1.1.4 Vesitsementtegur	28
1.2 Printimisbetoon.....	29
1.2.1 Kivistumata betooni omadused	33
1.2.2 Kivistunud betooni omadused	39
2. Tava- ning klaasliivaga betooni süsiniku jalajälje võrdlus	49
2.1 Süsiniku jalajälje arvutus katses kasutatud betoonisegudele	50
3. Katseline osa.....	53
3.1 Lähteandmed	53
3.2 Katseplaan.....	54
3.3 Katsemeetodid	54
3.3.1 Katsetes kasutatavad materjalid	54
3.3.2 Kuivsegude materjalikoguste arvutuskäik.....	55
3.3.3 Segude tähistamine.....	57
3.3.4 Kuivsegude valmistamine.....	57
3.3.5 Peentäitematerjali terastikulise koostise määramine sõelumismeetodiga	58
3.3.6 Mördi valmistamine segistiga „Hobart”	60
3.3.7 Mördi veevajaduse määramine.....	62
3.3.8 Mördi konsistentsi kadu	63
3.3.9 Katsekehade valmistamine	63
3.3.10 Mördi tiheduse määramine.....	64

3.3.11	Veega küllastunud katsekehade ruumala	65
3.3.12	Kivistunud katsekehade märgtihedus	65
3.3.13	Kivistunud prismade ruumala	66
3.3.14	Kivistunud katsekehade tiheduse määramine	66
3.3.15	Prisma surve- ja paindetugevuse määramine	67
3.3.16	Printimise osa	69
4.	Katseandmete analüüs.....	71
4.1	Peentäitematerjal.....	71
4.1.1	Kvartsliv- ja paisutatud klaasliiva sõelkõverate võrdlus.....	71
4.2	Kvartsliviva asendamise mõju klaasliiva vastu.....	73
4.2.1	Etalonsegu koostise valik ning omadus.....	73
4.2.2	Veevajadus	74
4.2.3	Konsistentsi kao määramine	77
4.2.4	Tihedus	79
4.2.5	Surve- ja paindetugevus.....	86
4.2.6	3D prinditavus	93
JÄRELDUSED	.....	95
KOKKUVÕTE	.....	97
Summary	.....	99
KASUTATUD KIRJANDUS.....		101
LISAD	.....	106
Lisa 1	kg CO ₂ e arvutus	107
Lisa 2	Esialgne katseplaan	108
Lisa 3	Klaas- ja kvartsliviva terastikulise koostise	109
Lisa 4	Veevajaduse määramise tulemused	110
Lisa 5	Konsistentsi kao määramise katsetulemused	111
Lisa 6	7 päevaste katsekehade tulemused.....	112
Lisa 7	21 päeva vanuste katsekehade tulemused	115

EESSÕNA

Magistritöö uurib peene- ja jämeda kvartslüiva asendamise mõju erinevate fraktsioonidega paisutatud klaasgraanulite vastu 3D printitavas betoonis. Antud magistritöö teema on välja pakutud juhendaja Tanel Tuisu poolt. Alustööks on Mihkel Pogga 2021. aasta magistritöö „3D printimisbetooni koostise alusuuring“, mille juhendajaks oli samuti Tanel Tuisk [1]. Etalonsegu koostis on valitud lähtudes alustööst. Täpsem katseplaan ning segude koostised täpsustati töö autori ja juhendajate vahel.

Lõputöö kirjanduslik osa toetub teadusartiklitele, standarditele ning lõputöö raames läbiviidud katsete tulemustele, lisaks on sisse toodud keskkonnamõju koos arvutusliku poolga. Katsed on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide õppelaboris ning Ehituse Mäemajas.

Suured tänusõnad eraldi lõputöö koostamisel nõu ja jõuga toetamise eest soovib autor edastada Tanel Tuisule. Tänu soovib autor avaldada ka Mattias Põldarule, kes oli abiks katsete läbiviimisel ning varustas klaasliivaga, ja Kadri-Ann Kertsmikule, kes juhendas ning aitas välja selgitada klaaskergetäitematerjali kasutamise mõju kvartslüiva asemel süsiniku jalajäljele. Lisaks soovib autor tänada kõiki, kes olid abiks, panustasid enda aega ning tegid koostööd antud lõputöö raames.

Võtmesõnad: betoon, 3D printimine, kergklaas täitematerjal, süsinikujalajalg, magistritöö.

TABELITE LOETELU

Tabel 1.1 Harilike tsementide klassifikatsioon vastavalt EVS 197-1 standardile [4].....	16
Tabel 1.2 Normväärtusna määratletud mehaanilised ja füüsilised nõuded vastavalt standardile EVS-EN 197-1:2011 [4]	17
Tabel 1.3 Klaasliiva omadused [8]	21
Tabel 1.4 Segu 33,3PL-OKL-8,3PK-8,3KK-50JK klaasliiva parameetrid.....	24
Tabel 1.5 Standardi EVS-EN 12620 tabel liiva peensuse määramiseks sõela 0,500 mm sõelda läbindi järgi [6]	26
Tabel 1.6 Standardi EVS-EN 12620 tabel liiva peenuse määramiseks põhinedes peensusmoodulil [6]	26
Tabel 2.1 Segude süsinikdioksiidi ekvivalendid.....	52
Tabel 3.1 Arvutustabel partii materjalide koguste saamiseks	57
Tabel 4.1 Ainult kvartsiivadega segude läbindite võrdlus	73
Tabel 4.2 Vesitsementteguri määramise tulemused	74
Tabel 4.3 Segude 2-5 ja segude 14-17 sisalduse võrdlus	76
Tabel 4.4 Konsitentsi kao määramise koondtulemused	78
Tabel 4.5 Värske mördi tihedused	80
Tabel 4.6 7 päeva vanuste immutatud katsekehade tihedused ja 21 päeva vanuste katsekehade tihedused RH 65% juures	86

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1 Magstritöös kasutatud klaasliiva fraktsioonid	21
Joonis 1.2 Mõrdi skeletti illustreeriv joonis a)tihedalt pakituna, kus on erineva fraktsiooniga täitematerjal; b) ühesuguse teratikuga täitematerjaliga suure tühiklikkusega skelett [10].....	27
Joonis 1.3 <i>Contour crafting</i> tehnoloogia illustratsioon [17].....	30
Joonis 1.4 <i>D-Shape</i> printimistehnoloogia [18]	31
Joonis 1.5 <i>D-Shape</i> protsessi põhimõte [18].....	31
Joonis 1.6 <i>D-Shape</i> tehhnoloogiaga printimine [18].....	31
Joonis 1.7 Mobiilne <i>Robotic Arm</i> [19]	32
Joonis 1.8 Kohtkindel <i>Robotic Arm</i> [19]	32
Joonis 1.9 Kaks robotit üheaegselt printimas <i>swarm 3D</i> meetodiga [21]	33
Joonis 1.10 Vasakul elastne paindumine, paremal plastiline purunemine [24]	36
Joonis 1.11 Katsete [23] käigus tehtud fotod. a) katsetes kasutatud laboriprinter; b) filament, mis tekib materjalivoolu järsu seiskumise tõttu; c) ebaühtlane materjali pealevool; d) liiga madala voolavuspingega alumine kiht [23]	37
Joonis 1.12 Printimisbetooni armeerimise võimalused a,b) välise perimeetri printimine, vertikaalselt paigaldatud armatuur, c) horisontaalsed vardad kihtide kaupa, d) eelnevalt paigaldatud armatuurvõrgu kasutamine, e) tugevdustraadiga üheaegne armeerimine printimisel [23]	39
Joonis 1.13 Erineva meetodiga valmistatud katsekehade poorsus [24].....	41
Joonis 1.14 Uuringu [31] katsekehade poorsuse tulemused	42
Joonis 1.15 A) VEL-proovi CT-pilt, mis näitab suurt kihisest tühimikku, mis asub vahetult vahekihi all, B) läbilõikefoto VEL-proovist, mis oli saetud, ja C) VEL-proovi CT-läbilõikefoto ja 3D-poorsuse render [31]	42
Joonis 1.16 7- ja 28- päevaste katsekehade paindetugevuse (vasakul) ja survetugevuse (pareml) tulemused [32]	44
Joonis 1.17 Massikadu valatud ja prinditud betoonidel peale 14, 28 ja 56 külmumis-sulatamistsükli [32].....	46
Joonis 1.18 Printimisbetooni tüüpilised kahanemistüübid [33].....	48
Joonis 2.1 Erinevate segude süsinikdioksiidi ekvivalent	52
Joonis 3.1 Paindetugevuse määramise katse koormamiskeem [45]	68
Joonis 4.1 Liivade sõelkõverate võrdlus.....	71
Joonis 4.2 Etalonsegu liiva sõelkõvera võrdlus M.Pogga magistritöö [1] etalonkvartsliidaseguga .	73
Joonis 4.3 Vesitsementtegurite väärtused vastavalt klaasliiva sisaldusele täitematerjalis	75
Joonis 4.4 Konsistentsi määramise kadu.....	77
Joonis 4.5 Värskete mörtide tihedused.....	81
Joonis 4.6 7 päeva vanuste veega immutatud katsekehade tihedused.....	83
Joonis 4.7 21 päeva kivistunud katsekehade tihedused RH 65% juures.....	84
Joonis 4.8 7 päeva vanuste veega immutatud katsekehade ja 21 päeva vanuste RH 65% juures tiheduste võrdlus	85
Joonis 4.9 Etalonsegu, segu nr 5, 13 ja nr 17 survetugevused.....	87
Joonis 4.10 Segude 2-5 ja etalonsegu survetugevused.....	88
Joonis 4.11 Segude 6-9 ja etalonsegu survetugevused.....	88
Joonis 4.12 Segude 10-13 ja etalonsegu survetugevused.....	89
Joonis 4.13 Segude 14-17 ja etalonsegu survetugevused.....	89
Joonis 4.14 Segude 2-5, 14-17 ja etalonsegu survetugevused.....	90

Joonis 4.15 Etalonsegu ja katsekehade, mille segaliiv 37,5% klaasliiv, survetugevused	91
Joonis 4.16 21 päeva vanuste katsekehade paindetugevuste tulemuste tulpdiaagramm	92
Joonis 4.17 Printimise ettevalmistuste väljavõte.....	94
Joonis 4.18 Segu nr 9 segumasinat	94

SISSEJUHATUS

Betoon on enamlevinud ehitusmaterjal maailmas. Üha rohkem on tänapäeva kiiresti arenevas maailmas aktuaalne teema globaalne soojenemine ning see on üks põhjuseid, miks ka betooni printimise vastu tuntakse üha rohkem huvi ja nähakse selles tuleviku potentsiaali. Betooni printimine võimaldab keerukaid elemente hõlpsalt valmistada ja automatiseerida betoonkonstruktsioonide tootmist, tänu millele lüheneb ehitise valmimisaeg, väheneb ehitusjätmete hulk ning vajadus inimtööjõule ja sellega kaasneva riski vähenemine. Printides betooni kaob raketise vajadus, millelt tuleneb samuti materjali ning aja kokkuhoid. Tänu eelmainitud aspektidele saame betooni printides vähendada betooni negatiivseid mõjusid keskkonnale.

Alates 2011. aastast on Leedu tehases valmistatud paisutatud klaasi graanuleid-klaasliiva, mis on tehtud taaskasutatud klaasist. 2013. aastal alustati valge paisutatud klaasgraanulite tootmist ning 2014.aastal toodi turule 6 erineva fraktsiooniga valget klaasliiva, mis kogub üha laialdasemalt populaarsust tänu enda kergele kaalule, headele soojusisolatsiooni omadustele, heliisolatsioonivõimele, madalale puistetihedusele ning kõrgele survetugevusele. Klaasliiva valmistatakse taaskasutatud klaasist, mis tõstab betooni keskkonnasäästlikkust ning aitab vähendada mittelagunevaid klaasijätmeid.

Antud magistritöö on kirjandusel, arvutustel ja katsetel põhinev uurimistöö, mille põhiline eesmärk on uurida ka klaasist kergtäitematerjali mõju betooni omadustele ning seejuures välja töötada baasretsept klaasist kergtäitematerjaliga 3D prinditud betooni koostisele. Seejuures uuritakse kumba liiva- kvartsliiv või paisutatud klaasliiva-kasutamine ehituses on keskkonnaasõbralikum valik ning mil määral avaldab mõju klaasliiva kasutamine süsiniku jalajäljele. Järeldused on tehtud läbiviidud katsete, kirjandusliku uurimistöö ning arvutuste tulemusel.

Käesoleva magistritöö esimene peatükk koosneb teoreetilisest poolest andes lühida ülevaate printimisbetooni koostisest, tema omadustest kivistumata ja kivistunud olekus. Printimisbetooni koostise peatükis on lähemalt uuritud antud magistritöös kasutatud klaaskergtäitematerjali kohta.

Teine peatükk sisaldab endas tavabetooni ja kergklaasliivaga betooni keskkonna mõju koos arvutusliku osaga. Samuti analüüsitakse arvutustulemusi.

Kolmas peatükk koosneb läbi viidud katsemeetodite kirjeldamisest, et lugejal oleks võimalik hõlpsalt katseid korrata. Katsetena on uuritud liiva teratikulist koostist ja

puistetihedust, mördi töödeldavust ja tihedust ning käsitsi valmistatud kivistunud katsekehade tihedust, survetugevust, paindetugevust.

Neljas osa koosneb läbiviidud katsete tulemustest ning nende analüüsist. Analüüsitakse nii käsitsi valmistatud katsekehade omadusi kui ka prinditud segude omadusi. Seotakse katsete tulemused teoreetilise osaga ning tehakse järeldusi. Selgitatakse millist mõju erineva fraktsiooniga klaasliiv printimisbetoonile avaldab.

Jämetäitematerjali käsitletavas betoonisegus puudub, kuna sellega segu printida ei ole võimalik. Seega jämetäitematerjali antud magistritöös ei käsitleta ning tegu on koostise järgi peeneteralise betooniga ehk mört, kuid mida käsitletakse antud töös kui tavabetooni.

1. PÕHIOOSA

1.1 Printbetooni koostisosad

Betoon on põletamata tehiskivi, mis saadakse vastavalt standardile EVS-EN 206:2014 +A1:2016/AC:2019 „Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus” omavahel segatud tsemendist, peen- ja jämetäitematerjalist ning veest ning millele võib lisada keemilisi ja/või peenlisandeid ja/või kiudu. Betooni omadused kujunevad tsemendi hüdratatsiooni tulemusena. [2] Tegu peeneteralise betooniga ehk mördiga, mida antud magistritöös käsitletakse kui tavabetooni, kuna leiab kasutust kui tavabetoon.

1.1.1 Sideaine

Sideaine ülesanne on kahe või enama materjali kokku sidumine, mida kasutatakse tehiskivide, betoonide ja mörtide valmistamiseks. Tsement on hüdrauliline sideaine, mis kivineb peale tardumist nii õhus kui ka vees. [3] Vastavalt standardile EVS 197-1 „Tsement. Osa 1: Harilike tsementide koostis, spetsifikatsioonid ja vastavuskriteeriumid” nimetatakse tsemendiks peeneks jahvatatud anorgaanilist materjali, mis kuulub hüdrauliliste sideainete hulka. Peale veega kokkupuudet moodustub hüdratiseerumisreaktsioonide ja -protsesside tagajärjel tarduv ja kivinev mass, mis peale kivinemist ei kaota oma stabiilsust ega tugevust vee all. [4]

Antud magistritöös puudutame CEM-tüüpi tsemente, mis koosnevad erinevatest materjalidest, kuid mille koostis on homogeenne ning mille tootmisprotsessi kvaliteet on tagatud. CEM viitab tsemendile ning sellele järgnev rooma number tähistab tsemendi tüüpi vastavalt standardile EVS-EN 197-1. Tabelis 1.1 on välja toodud harilike tsementide baasil klassifikatsioon vastavalt koostisele. [4]

Tsemendi põhikoostisosad on:

- portlandtsemendi klinker (K);
- granuleeritud kõrgahjuräbu (S);
- putsolaanmaterjalid (looduslik P, tehiskivi Q);
- lendtuhk (räniline V, kaltsiumiline W);
- põletatud põlevkivi (T);

- lubjakivi (süsiniku sisaldus kuni 0,20 % massist LL, kuni 0,50 % massist L);
- peenräni (D). [3]

Tsemendid jagunevad vastavalt selles sisalduvast teisest põhikoostisosast viite põhigruppi:

- portlandtsement (CEM I)– vähemalt 95% portlandtsementi, kuni 5 % looduslikku kipsi;
- portland-komposiitsemend (CEM II)- peale portlandtsemendiklinkri, mida on 65-94 %, sisaldab veel kahte või rohkemat põhikoostisosa;
- räbutsement (CEM III)– portlandtsemendiklinkrit <65 %. Kõrgahjuräbu sisaldus võib olla kuni 95 %;
- putsolaantsement (CEM IV)– sisaldab putsolaane, klinkrisisaldus <65 %;
- komposiitsemend (CEM V)– mitmest põhikoostisosast tsement. Portlandtsementiklinkri sisaldus 65 %, kõrgahjuräbu 20-64 %, teised 18-50 %. [4]

Tabel 1.1 Harilike tsementide klassifikatsioon vastavalt EVS 197-1 standardile [4]

Pohi- toobid	27 toote nimetused (harilike tsementide toobid)		Koostis (% massist ^a)										Lisa- koostis- osad	
			Põhikoostisosad											
			Klinker	Kõrg- ahju- rabu	Peen- rāni	Putsolaan		Lendtuhk		Pole- tatud põlev- kivi	Lubjakivi			
						looduslik	tehislik	rāniline	Kaltsiu- miline		L	LL		
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandsement	CEM I	95–100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
CEM II	Portland- rābutsement	CEM II/A-S	80–94	6–20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-S	65–79	21–35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	Portland- peenrānitsement	CEM II/A-D	90–94	–	6–10	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	Portland- putsolaantsement	CEM II/A-P	80–94	–	–	6–20	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-P	65–79	–	–	21–35	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-Q	80–94	–	–	–	6–20	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-Q	65–79	–	–	–	21–35	–	–	–	–	–	–	0–5
	Portland- lendtuhtsement	CEM II/A-V	80–94	–	–	–	–	6–20	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-V	65–79	–	–	–	–	21–35	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-W	80–94	–	–	–	–	–	6–20	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-W	65–79	–	–	–	–	–	21–35	–	–	–	–	0–5
	Portland- põlevkivitsement	CEM II/A-T	80–94	–	–	–	–	–	–	6–20	–	–	–	0–5
		CEM II/B-T	65–79	–	–	–	–	–	–	21–35	–	–	–	0–5
	Portland- lubjakivitsement	CEM II/A-L	80–94	–	–	–	–	–	–	–	6–20	–	–	0–5
		CEM II/B-L	65–79	–	–	–	–	–	–	–	21–35	–	–	0–5
		CEM II/A-LL	80–94	–	–	–	–	–	–	–	–	6–20	–	0–5
CEM II/B-LL		65–79	–	–	–	–	–	–	–	–	21–35	–	0–5	
Portland- komposiitsement ^c	CEM II/A-M	80–88	<----- 12–20 ----->										0–5	
	CEM II/B-M	65–79	<----- 21–35 ----->										0–5	
CEM III	Rābutsement	CEM III/A	35–64	36–65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM III/B	20–34	66–80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM III/C	5–19	81–95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
CEM IV	Putsolaan- tsement ^c	CEM IV/A	65–89	–	<----- 11–35 ----->					–	–	–	0–5	
		CEM IV/B	45–64	–	<----- 36–55 ----->					–	–	–	0–5	
CEM V	Komposiit- tsement ^c	CEM V/A	40–64	18–30	–	<----- 18–30 ----->			–	–	–	–	0–5	
		CEM V/B	20–38	31–49	–	<----- 31–49 ----->			–	–	–	–	0–5	

a Tabelis toodud vārtus kehtib pōhi- ja lisakoostisosade summale.
b Peenrāni sisaldus ei tohi oletada 10 %.
c Portland-komposiitsetsementide CEM II/A-M ja CEM II/B-M, putsolaantsementide CEM IV/A ja CEM IV/B ning komposiitsetsementide CEM V/A ja CEM V/B puhul tuleb tsemendi māaratlemisel mārkinda nende pōhikoostisosad (nāiteid vt jaotisest 8).

Lisaks jaotatakse tsemente vastavalt nende tugevusele, kāsitletakse kolme erinevat normtugevusklassi. 28-pāeva garanteeritud tugevusnāitajateks on 32,5; 42,5 ja 52,5 (MPa). Vastavalt eeltugevusele jagunevad need tsemendid veel kolme klassi:

- normaalkivinevad, mis on tavalise eeltugevusega (tāhis N);
- kiirkivinevad, mis on suure eeltugevusega (tāhis R);
- aeglaselt kivinevad, mis on vāikese eeltugevusega (tāhis L). [4]

Tabelis 1.2 on vālja toodud erinevate tsemendiklasside mehaanilised ja fūisikalised nōuded.

Tabel 1.2 Normväärtusna määratletud mehaanilised ja füüsilised nõuded vastavalt standardile EVS-EN 197-1:2011 [4]

Tugevus- klass	Survetugevus MPa			Tardumise algus	Mahu- püsivus (paisumine)
	Eeltugevus		Normtugevus		
	2-päevane	7-päevane	28-päevane	min	mm
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 N	-	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 L ^a	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 N	≥ 10,0	-			
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 L ^a	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45
52,5 N	≥ 20,0	-			
52,5 R	≥ 30,0	-			

^a Tugevusklass on ette nähtud ainult CEM III tsementidele.

Antud magistritöö katsetel on kasutatud CEM II/A-M(T-L) 42,5 R tsementi. A-M (T-L) on Kunda Nordic tsementidest kõige keskkonnasõbralikum. Tulenevalt oma koostisest tekitab valmistamisel kõige vähem süsihappegaasi.

Tähis CEM II/A-M viitab, et tegu on portland-komposiitsemendiga, mis sisaldab vastavalt tootjapoolsele infole 85% portlandtsemendi klinkrit koos kipsiga, 9% põletatud põlevkivi (tähis T) ning 6% lubjakivi (tähis L). [5] Vastavalt numbrile 42,5 on tegu keskmise tugevuse tsemendiga, mille normtugevus 28 päeva vanuselt on vähemalt 42,5 (MPa), maksimaalselt kuni 62,5 (MPa). R tähistab omadust kiirkivineda ehk saavutada varajane survetugevus. Sideainekivi varajane tugevus on seda suurem, mida suurem on sideaine/tsemenditerade kogupind. Mida suurem on reaktsioonipind veega, seda paremini ning kiiremini saavad hüdratatsioonireaktsioonid toimuda. Terade kogupind on seda suurem, mida suurem on jahvatuspeensus. Peale esmast reaktsiooni ei pääse vesi vabalt tsemendini vaid teeb seda läbi moodustunud mineraalidest difusiooni teel, mistõttu edasised hüdratatsioonireaktsioonid järjest aeglustuvad. Hüdratatsiooniprotsessi tulemusena moodustuvad kristalsed ja geelitaolised uusmoodustised. Teggu on eksotermilise protsessiga. Mida suurema jahvatuspeensusuga on sideaine, seda suurem on eksotermia algul, kõrgem temperatuur omakorda kiirendab hüdratatsiooniprotsessi. Suurem eripind suurendab ka tsemendi veevajadust. Peale eripinna sõltub tsemendi tugevuse kasvamise kiirus tsemendi koostisest. Portlandtsemendi klinkri põhimineraalidega aliidi ja/või trikaltsiumaluminaadi suure sisaldusega tsemendid kivinevad kiiresti, saavutavad kõrge

varajase tugevuse ning on suure eksotermiaga. Vastupidiselt suure beliidi ja/ või celiidi sisaldusega tsement on aeglaselt kivinev. [3] Suur eksotermia on suureks probleemiks kuna tigupumpade töökeha töötab hõõrdumisel ja tekitab ka segule lisasoojust. Mõlema temperatuuri tõus võib kiirendada tardumisprotsesse ja halvendada printimist.

Tsemendi tardumine on protsess, mil tsemenditaigen on kaotanud füüsikalise- keemiliste protsesside tulemusena plastuse, kuid ei oma tugevust, et vastu võtta välisjõude. [3] Tardumine on samuti otseses seoses tsemenditerade eripinnaga. Mida suurem on tsemenditerade pind seda kiiremini saabub tardumisaja algus ja tardumisaeg. Antud magistritöös kasutatava tsemendi eripind on 510 (m²/kg), tardumisaja algus 110 min, 1-päevane survetugevus 20 (MPa) ja 28-päevase tsemendikivi survetugevus 58 (MPa) [5].

Kasutatud tsemendis sisalduv:

- portlandklinker- annab tugevuse, kivineb kiiresti, suured mahukahanemised;
- (looduslik) kips- töötab tardumisaja reguleerijana. Moodustuvad etteringiidid, mis takistavad betoonisegu kohest kõvenemist veega kokkupuutel;
- lubjakivi (L)- parandab segu veehoidvust ja vähendab segregeerumist ning veeeralduvust, mis pumbatavate betoonisegude puhul on oluline, vähendab portlandtsemendi tugevust;
- põletatud põlevkivi (T)- muudab valmistatava betooni külma- ja korrosioonikindlamaks. Vähendab mahukahanemisi, kivineb kiiremini. Kahandab tugevust. Põhikoostisosana kasutatavale põletatud põlevkivile esitatakse nõuded standardis EVS 636. [3]

1.1.2 Täitematerjal

Täitematerjal on teraline materjal, mille ülesanne on betooni jäiga skeleti moodustamine ning betooni mahukahanemise vähendamine. Lisaks on täitematerjali maksumus oluliselt soodsam kui tsemendil. Täitematerjalile esitatavad nõuded ning nende regulatsioon on välja toodud standardis EVS-EN 12620:2005+A1:2008 „Betooni täitematerjalid“. [6]

Täitematerjal jaguneb tera suuruse järgi:

- peentäitematerjal - tera suurus kuni 4 mm;
- jämetäitematerjal – tera suurus on suurem kui 4 mm.

Päritolu järgi:

- looduslik – loodusliku päritoluga mineraalne täitematerjal, mida on töödeldud vaid mehaaniliselt. Näiteks kvartslüü, killustik;
- tehisk – mineraalse päritoluga täitematerjal, mida on töödeldud termiliselt või mõne muu muundeprotsessi tulemusena. Näiteks EPS, XPS;
- taaskasutatav – täitematerjal, mille puhul on varasemalt ehituses kasutusel olnud materjal ümber töödeldud. Näiteks klaasliiv. [6]

Peentäitematerjal on sõmer materjal, mis võib olla saadud kivimite või kruusa loomuliku murenemise tagajärjel, kivimite ja kruusa purustamisel või tehiskäitematerjali töötlemisel [3]. Tavaliselt kasutatakse Eestis peentäitematerjalina looduslikku kvartslüü, mis võib olla mägiliiv ehk karjääriliiv või jõeliiv.

Pidevast vee liikumisest põhjustatud erosiooni tõttu on veekogude põhjas olev liiv ümar ning sileda pinnaga. Sile pind parandab mördisegu töödeldavust, mistõttu leiavad need liivad kasutust näiteks põrandasegudes. Mägiliiv ja moreenliiv on aga nurgelised, mistõttu on see paremate nakkeomadustega ning sideaine saab seetõttu paremini haakuda muutes mördi tugevamaks. [3]

Käesolevas magistritöös on kasutatud kuiva 0...0,5 mm ning 0,5...1,2 mm fraktsioonidega mägiliiva, mis kuuluvad loodusliku peentäitematerjali alla. Valikul lähtuti printimisbetooni kujuhoidvuse vajalikkusest, mille tagab väiksem töödeldavus ehk nurgelisemad terad. Betooniseguse kasutamiseks sobilik liiva koostis peab vastama järgmistele nõudmistele/nõuetele:

- orgaanilisi aineid ja huumuse sisaldus peab jääma alla 0,25 %, kuna takistavad tsemendi kivistumist;
- tolmu ja savimineraalide sisaldus <3 %, kuna tolm tõstab segu veevajadust ning saviosakesed takistavad kivistumist ja vähendavad naket täitematerjali ja tsemendikivi vahel;
- ei tohi sisaldada amorfset ränioksiidi ja maagimineraale, kuna põhjustavad betooni korrodeerumist ja lagunemist;
- ei tohi sisaldada väävlit ega väävliühendeid, kuna võivad põhjustada ebasoovituid reaktsioone ning paisumist betoonis;
- kloriidide sisaldus peab olema piiratud, kuna võivad põhjustada terasarmatuuri korrosiooni;
- ei tohi sisaldada vilgukivi, sest see on kihiline ja siledapinnaline nõrgestades struktuuri. [3]

Peale kvartslüiva on antud magistritöös kasutatud veel JSC Stikloporas ettevõtte poolt toodetud klaasliiva. Paisutatud klaasliiva valik tulenes soovist näha tema mõju printimisbetoonile, uurida millist mõju klaasliiv betoonisegule avaldab ning välja selgitada kas klaasliiv on keskkonnasõbralikum valik kui klaasliiv.

Klaasliiva valmistamiseks taaskasutatakse klaasi jäätmeid. Kogu tootmine toimub tootmiskontrollisüsteemi ja pideva järelvalve alusel, vastavalt standarditele EN 13055-1:2002 ja EN 13055-1:2002/AC:2004 „Kergtäitematerjalid. Osa 1: Betooni ja mördi kergtäitematerjalid“ [7]. Tootmisprotsess seisneb:

1. Tehasesse tuuakse tooraine, milleks on klaasijäätmed/klaasikillud.
2. Viiakse läbi kontroll, et klaas vastaks kvaliteedistandarditele.
3. Toimub klaasi purustamine ja jahvatamine.
4. Jahvatatud klaasi segatakse gaasitekitajatega.
5. Moodustunud graanulid sulatatakse ülikõrgel temperatuuril.
6. Tulemusena saadakse erineva läbimõõduga valged klaasgraanulid, mis fraktsioneeritakse vastavalt soovitud suurustele. Standardvahemikud on 0,1...0,3 mm; 0,25...0,5 mm; 0,5...1,0 mm; 1,0...2,0 mm; 2,0...4,0 mm; 4,0...8,0 mm ning 8,0...16,0 mm. [8]

Eelkirjeldatud viisil valmistatud klaasliiv on suletud pooridega. Suletud poorid annavad materjalile head soojus- ning heliisolatsiooniomadused, tõstavad materjali külmakindlust. Paisutatud graanuli olemuse tõttu eeldab autor klaasliivaga segule töödeldavude tõusu ning kujuhoidvuse langust.

Klaasliiv oma olemuselt on paisutatud klaas. Madala soojuserijuhtivusega anorgaaniline isoleermaterjal, mida kasutatakse kergtäitematerjalina erinevates ehitussegudes, liimides, värvides. Materjal on mittesüttiv, kuumuskindel kuni temperatuurini 750 °C, sulamistemperatuur >1000 °C. Tihedus vastavalt fraktsioonile 100-400 (kg/m³), kergem kui vesi, seega ei vaju põhja. Hetkel puudub täpne info, millist ohtu seab keskkonnale. Soojusjuhtivustegur 0,04 kuni 0,08 (W/m²K). Lahustub vesinikfluoriidhappes. Kogu klaasliiva tootmine on määratletud regulatsioonidega, mis on leitavad tootja kodulehelt. [8]

Klaasliiva keemiline koostis:

- silikondioksiid SiO₂ sisaldus 71,0 – 73,0 %;
- alumiinimoksiid Al₂O₃ sisaldus 1,5 – 2,0 %;

- $K_2O + Na_2O$ sisaldus 13,0 – 14,0 %;
- $CaO + MgO$ sisaldus 8,0 – 10,5 %;
- Fe_2O_3 sisaldus kuni 0,3 %;
- muud aineid kuni 0,5 %. [8]

Tabel 1.3 Klaasliiva omadused [8]

	Fraktsioon [mm]		
	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...4,0
Puistetihedus [kg/m^3] (+/- 15%)	270	230	200
Tera tihedus [kg/m^3]	420	0,37	0,34
Survetugevus [+/- 0,5 MPa]	1,7	2	1,4
Soojusjuhtivustegur [$W/(mK)$]	0,0713	0,0663	0,0639
Veeimavus % massi kohta (+/- 15%)	18 (15,3-20,7)	18 (15,3-20,7)	15 (12,75-17,25)



Joonis 1.1 Magstritöös kasutatud klaasliiva fraktsioonid

Tootja kodulehel [8] on välja toodud klaasliiva eelisteks projekteerijatele:

Projekteerijate seisukohalt võiks klaasliiva tootja kodulehe [8] järgi eelistada, kuna klaasliiva kasutamine tagab:

- kuni 30 % väiksemad küttekulud ning 25 kuni 35 % väiksemad soojuskaod – Suletud pooridega klaasliival on väiksem soojuserijuhtvus võrreldes kvartsliiduga, mistõttu temperatuuri levik ühelt konstruktsiooni poolelt teisele on aeglasem. [3];
- tulekaitse- paisutatud klaasliiv on mittesüttiv ja mittelenduv materjal;
- head heliisolatsiooni omadused– suletud pooridega materjalid neelavad helisid tagades hea heliisolatsiooni. Kui helilaine siseneb suletud pooridega materjali, siis see paneb siseõhu suletud poorides vibreerima, mis põhjustab õhu ja materjali vahel hõõrdumise, mis muudab enamik helienergiat soojusenergiaks. Soojusenergia hajub läbi soojusülekande õhu vahel;
- riskivaba inimese tervisele– klaasliiv on suletud pooridega, milles närilised ega putukad ei paljune. Lisaks on klaasliiv oma koostiselt ebasoodne bakterite ja hallituse arenguks.
- paisutatud klaasgraanulid on sobilikud kaasaegsete õhukeste ja/või erikujuliste/mittestandardsete konstruktsioonide kujundamiseks. Võrreldes tavaliivaga on klaasliival väiksem tihedus ning paremad soojusisolatsiooniomadused, mistõttu saame samade soojus- ja heliisolatsiooniomadusi silmas pidades klaasliivaga seinaga paksuselt kokku hoida. Seejuures tuleb arvestada, et klaasliivaga kergtäitematerjaliga seinaga kande võime on tunduvalt väiksem, kui kvartsliiduga;
- kuni 40 % väiksem konstruktsiooni mass- tegu on väga kerge täitematerjaliga, mille tihedus on tänu suletud pooridele madal, mistõttu on samade mõõtmetega seinaga mass väiksem. [9]

Eelised ehitaja seisukohalt on vastavalt tootja kodulehele [9] on:

- värvus– valge värv on esteetiline ning võimalik teha nähtava struktuuriga soojusisolatsioonikrohvi valmistamisel;
- soodne transport– klaasliiva kerge mass võimaldab madalamaid transpordikuluseid. Ühte koormasse mahub mahult rohkem täitematerjali;

- keskkonnasõbralik lahendus- klaasliiv on keskkonnasõbralik, sisaldades 100% taaskasutatavat klaasi. Seda väidet uuritakse ka antud magistritöö raames;
- kasutajasõbralik – kerge massi tõttu on lihtne transportida, tassida ja kasutada. Tehases valmistatud plaate on võimalik hiljem objektile vajadusel ka lõigata. [8]

Vastavalt tootja kodulehele [9] kasutatakse klaasliiva:

- 1) krohv ja kuivsegud- graanulite kinnised poorid soodustavad soojusisolatsioonimadusi, helisummutust ja niiskuskindlust. Kasutatakse 0,25...2,00 mm fraktsiooni;
- 2) kergbetoonkonstruktsioonide täitematerjal- klaasgraanulid aitavad vältida külmasildade mõju niiskuse ja külma sattumisel vundamentidesse tänu oma suletud pooridele. Toote mass on kuni 60 % väiksem, veeimavus on 2 kuni 4 %, soojusjuhtivus 0,09 W/(m°K), survetugevus 5,4 MPa ning materjali tihedus 950 kg/m³. Lisaks leiab klaasliiv kasutust ka mittekandvatel seinte puhul, andmeid sellise betooni tehnilistest parameetritest leiab tootja kodulehelt [8]. Üldiselt kasutatakse 2,0...8,0 mm fraktsiooni;
- 3) kergpaneelide tootmine – klaasliiva kerge kaaluga on võimalik konstruktsiooni kogumassi vähendada kuni 50 %. Kergpaneelid leiavad kasutust nii uutel kui ka vanade ehitiste puhul, millel on võimalik asendada nii telliseid kui ka paneele. Klaasgraanulite puhul eelis ka väga head heliisolatsiooniomadused kui ka niiskuskindlus. Kasutatakse üldiselt 0,5...4,0 mm graanuleid;
- 4) soojusisolatsiooni agregaatides – klaasgraanuleid kasutatakse lahtise puistesoojusisolatsiooni materjalina. Tema eeliseks on kerge mass ja hingavus, mistõttu niiskus ei kogune tuppa. Klaasgraanulid on ebasoodsad hallituse, bakterite ja kahjurite jaoks luues tervisliku keskkonna. Tavaliselt kasutatakse 4,0...16,0 mm läbimõõduga fraktsiooni;
- 5) 3D printimine – klaasgraanulid on ideaalne materjal 3D printimiseks. Õiges koguses õige läbimõõduga graanulite kasutamine vähendab konstruktsiooni kaalu kuni 70 % säilitades samal ajal samad või isegi veelgi paremad omadused võrreldes kvartsliiduga. Põhjus seisneb klaasliiva madalas puistetiheduses ning kõrges survetugevuses. Ennatlikult võib selle väite kahtluse alla seada, kuna väiksem tihedus ning suurem tugevus ei ole kooskõlas. Lisaks ei vaja printimisbetoon täiendavat isolatsiooni, kuna klaasgraanulid on juba väga heade

soojusisolatsiooniomadustega. See aitab säästa nii raha kui ka aega. Kasutatakse 0,25 mm...4,0 mm läbimõõduga graanuleid;

- 6) polümeerbetooni täitematerjalina – klaasgraanulitega polümeerbetoon on väga vastupidav ja kerge kaaluga. Põhiliselt leiab kasutust vannitubades ja köögi töötasapindade valmistamisel. Kasutatakse üldiselt 4,0...8,0 mm läbimõõduga graanuleid;
- 7) klaasgraanulid on sobiv toode kasutamaks kohtades, kus on kõrged nõudmised tuleohtlikkusele, bioloogilisele või keemilisele vastupidavusele. Lisaks on leidnud kasutust ka nafta kaevandamisel isolatsioonimaterjalina, energeetikas, põllumajanduses, toiduainetööstuses, biofiltritatsioonitööstuses. [9]

Esitatud väidete õigsust tuleks analüüsida kriitiliselt.

Poorsuse arvutus antud töös kasutatud materjalidele

Antud magistritöös kasutati EMG Kuiv Liiv OÜ kvartslüüa ning JSC Stikloporas poolt toodetud klaasliiva. M. Pogga magistritöös [1] on kasutatud sama kvartslüüa, mille tera tiheduseks sai M. Pogga peenliiva korral 2630 kg/m³ ning keskliival 2644 m³.

Antud magistritöös 75 liitri kuivsegu 33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK kuivsegu sisaldab endas 56,25 liitrit segaliiva, millest 37,47 liitrit on klaasliiv. Tabelis 1.4 on välja toodud eelmainitud segu õhusisalduse arvutus. Kvartslüüal tera tihedus on võrdväärne absoluutse tihedusega. Seega on terade õhusisaldus ~0 %, mistõttu kvartslüüa ei ole segu õhusisalduse arvutustes arvestatud.

Tabel 1.4 Segu 33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK klaasliiva parameetrid

Klaasliiv	Teratihedus [kg/m ³]	Absoluutne tihedus [kg/m ³]	Terade õhusisaldus [%]	Osakaal klaasliivast [%]	Kogus [kg]	Mitu liitrit õhku segusse läinud liivas?
Peenklaas	420	2500	16,8	12,5	4,67	0,785
Keskklaas	370		14,8	12,5	4,67	0,691
Jämeklaas	340		13,6	75	28,13	3,826

ΣV_{õhk} 5,30 l / 75 l kohta
~7,1 % õhku

Selgub, et 75 liitrit kuivsegu kohta on täitematerjali terades 5,30 liitrit õhku. Õige töödeldavuse saavutamiseks vajab 33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK 75 liitrit kuivsegu vastavalt laborikatsete tulemustele 12,96 liitrit vett (VT= 0,48). Printimisel selgus, et juurde oli vaja lisada 0,75 liitrit vett. Seega läks segusse 100 % veekoguse asemel

102,7 % vett. Juurde lisatud vesi oli vajalik , kuna printimisprotsessi käigus surutakse tsemendipastas kasutusel olev vesi klaasliiva sisse. Mingi osa esialgu lisatud veest imati klaasliiva poolt samuti endasse. Eraldi juurde lisatud vesi moodustab suletud pooride mahust 14,2 %.

Liiva terastikuline koostis

Terastikulise koostise valikul tuleb lähtuda mördi ekspluatatsioonitingimustest, kasutamise eesmärgist ja paigaldusviisist. Seejuures tuleb silmas pidada, et ühte omadust parandades võib mõni teine halveneda. Näiteks tugevaks tehiskiviks on vajalik tihedat skeletti. Selleks on vajalik õigete suhetega erineva läbimõõduga terastikulist koostist, nii et oleks täidetud võimalikult palju terade vahele jäävatest tühikutest. Tugevusomadust taga ajades tuleb arvestada, et mida tihedam on skelett, seda vähem töödeldav on segu. Mida rohkem on väikeseid liivaterasid, seda suurem on eripind, ning seda rohkem on vaja tsementi terade „liitmiseks“. Mida rohkem on väikeseid liivaterasid, seda suurem on ka liiva kogupind ehk seda suurem on veevajadus ka liiva märgamiseks. [3]

Peenuse järgi jaotatakse liivad:

- 1) jämedateralised (tähis C);
- 2) keskmiseteralised (tähis M);
- 3) peeneteralised (tähis F).

Vastavalt standardile EVS -EN 12620 [6] on võimalik peensus/jämedust kirjeldada kahel viisil. Esimene viis toetub 0,500 mm sõela läbindile massiprotsentides ning lisatakse juurde täht P. Klassifikatsioon on välja toodud tabelis 1.5. Teine moodus põhineb peenusmooduli (tähis FM) järgi jaotamisel, mille puhul peenusmoodul arvutatakse välja järgmiste sõelte täisjääkide summana valemiga 1.1 ning jaotatakse vastavalt tabelile 1.6. [6]

$$FM = \frac{\sum[(> 4) + (> 2) + (> 1) + (> 0,25) + (> 0,125)]}{100} \quad (1.1)$$

Tabel 1.5 Standardi EVS-EN 12620 tabel liiva peensuse määramiseks sõela 0,500 mm sõelda läbindi järgi [6]

Liiva peenus sõela 0,500 mm läbindi järgi		
Jämedateraline	Keskmiseteraline	Peeneteraline
5...45 %	30...70 %	55...100 %

Tabel 1.6 Standardi EVS-EN 12620 tabel liiva peensuse määramiseks põhinedes peensusmoodulil [6]

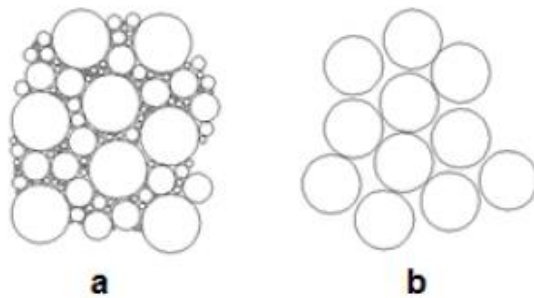
Peensusmoodul		
CF	MF	FF
4,0...2,4	2,8...1,5	2,1...0,6

Mida suurem on täitematerjali peenus, seda suurem on nende pindade summaarne pindala, mida vesi märgab ehk seda suurem on mördi veevajadus sama konsistentsi saavutamiseks. Veemolekulid kinnituvad täitematerjali terade külge adhesiooni mõjul. Antud magistritöös kasutatakse terastikulise koostise iseloomustamiseks 0,500 mm sõela läbindeid.

Tühiklikkus

Pakketiheduse saavutamiseks on otstarbekas arvutada liiva tühiklikkus. Tühiklikkuse all mõistetakse täitematerjali terade vahelist õhuga täidetud ruumi. Joonisel 1.2 on illustreeritud tihedalt pakitud ning suure tühiklikkusega täitematerjali skeletid. Soovituslik tühiklikkus on liival umbes 40 %. [3]

Mida suurem on mördi tühiklikkus, seda rohkem vett on vaja tühikute täitmiseks ning seega seda suurem on veevajadus. Tühikuid täitev vesi ei ole keemiliselt ega adhesiooniga segu teiste osakestega seotud, mistõttu suurendavad tühikud betoonisegu töödeldavust, suureneb tekkivate kapillaarpooride hulk ning väheneb veehoidvus. Tühiklikkus leitakse liiva puistetiheduse ja näivtiheduse kaudu arvutades. [3]



Joonis 1.2 Mördi skeletti illustreeriv joonis a) tihedalt pakituna, kus on erineva fraktsiooniga täitematerjal; b) ühesuguse teratikuga täitematerjaliga suure tühiklikkusega skelett [10]

1.1.3 Keemilised lisandid

Betoonisegu või kivistunud betooni omaduste reguleerimiseks kasutatakse betooni koostises mitmesuguseid keemilisi lisandeid.

Plastifikaatorid ja superplastifikaatorid-vähendavad betoonisegu veevajadust ning tõstavad mördi töödeldavust.

Õhku manustavad lisandid tõstavad kivistunud betooni külmakindlust.

Veehoidvust suurendavad lisandid vähendavad betoonisegust vee väljavalgumist.

Tardumist kiirendavad ja aeglustavad lisandid võimaldavad reguleerida tardumisprotsessi kiirust, mis on oluline tööde teostamise iseloomul.

Kivinemist kiirendavad lisandid võimaldavad suhteliselt madala temperatuuri juures kiirendada betooni tugevuse saavutamist.

Külmumist takistavad lisandeid kasutatakse vältimaks värsket betoonisegu külmumist miinuskraadide korral. Alaneb külmumistäpp.

Hüdriisoleerivad lisandid parandavad betooni püsivust vees ja agressiivses keskkonnas.

Peenlisandid ehk peenmaterjalid, mida kasutatakse betooni mingi teatud omaduse parandamiseks või eriomaduse saavutamiseks. Neid on kahte tüüpi:

1. peaaegu inertsed lisandid, mis ei võta osa keemilistest reaktsioonidest. Näiteks pigmendid
2. Putsolaan- või varjatud omadustega peenlisandid.

Komplekslisanditeks nimetatakse erinevatest lisanditest koosnevaid lisandeid. [3, 12]

Antud magistritöös lisandeid ei kasutata kahel põhjusel:

- 1) Ilma lisanditeta saame selgelt välja tuua klaasliiva mõju.
- 2) Lisandite mittekasutamine on keskkonnasõbralikum.

1.1.4 Vesitsementtegur

Betoonisegu jaoks kasutatav vesi on vajalik tsemendi reageerimiseks, täitematerjali märgamiseks ning mördi vajaliku töödeldavuse saavutamiseks. Vajalikku vee massi kirjeldatakse vesitsementteguri kaudu. Vajalik vee mass on vee segu koostisest. Mida suuremat töödeldavust soovime saavutada, seda rohkem on vaja vett. Mida suuremad on täitematerjali ja tsemendi eripinnad, seda rohkem läheb sama töödeldavuse saavutamiseks vett vaja. Tavaliselt kasutatakse segudes lisandeid ning, mistõttu tuleb arvestada veel erinevate lisandite mõju.

Kasutatav vesi ei tohi sisaldada sulfaate, kloriide, huumust, õli, rasva, suhkrut ja happeid. Olenevalt vee liigist/päritolust võib olla vajalik pidev laboratoorne kontrollimine ja/või puhastamine. Mitmesuguste soolade ja orgaaniliste ainete sisaldus seguvees on piiratud, kuna need võivad betooni kivistumist takistada või põhjustada hilisemat lagunemist korrosioonireaktsioonide tõttu. [3] Täpsemad seguvee nõuded on esitatud standardis EVS-EN 1008:2002 „Betooni seguvesi. Veeproovide võtmine, katsetamine ja kasutuskõlblikkuse hindamine, sh betoonitootmisest pärineva taaskasutatava vee kasutamine betooni seguveena“ [12].

Betoonisegu segamisel veega kaasneb betoonisegusse ka kaasatud õhk, mis tekitab poorsust.

Antud magistritöös kasutati joogivee (Ehitajate tee 5, Tallinn) kvaliteediga vett, mis oli seisnud vähemalt ööpäeva eelnevalt toatemperatuuril. Joogivee kvaliteedile vastavat vett ei ole standardi EVS-EN 1008 [12] kohaselt vaja katsetada. Segude vesitsementtegurid tulenesid segu töödeldavusest 150 mm 5 mm.

Betoonisegu poorsus

Mördi poorsus sõltub tihedusest, millest sõltub tugevus. Poorsuse moodustavad erineva kuju ja suurusega poorid, mida tekitavad:

- kaasatud õhk – tekib betoonisegu segamise, paigaldamise ja transpordi ajal. Mida paremini segu tihendatakse, seda vähem seda on, kuid täielikult välja ei ole võimalik seda saada. Poorid on peamiselt kinnised. Moodustab kuni 5% betoonisegu massist;
- ära kasutatud vee asemel moodustuvad kivinevas struktuuris kapillaarpoorid. Mida rohkem on vaba vett, mis ei seondu tsemendiga ega võta osa täitematerjali märgamisest, seda rohkem tekib betooni väljakuivamisel kapillaarpoore. Kapillaarpoorede suurus jääb vahemikku 0,001 µm kuni 1 µm. Vaba vett on betoonisegus seda rohkem, mida suurem on täitematerjali tühiklikkus;
- õhku manustatavad lisandid segus, mis tekitavad kinniseid poore ning on teadlikult ning tahtlikult lisatud.[3]

1.2 Printimisbetoon

Alates 1996. aastast, mil Behrokh Khoshnevis mõtles välja esimese 3D printimise protsessi ja tehnoloogia, on sellega järjest enam tegeletud [13]. 3D printimist kasutatakse nõ „kiire prototüüpimise“ jaoks. Printimise etapid tavalise kolmemõõtmelise printimise puhul ja betooni 3D printimise puhul on samasugused. Luuakse 3D mudel, mida on võimalik kiiresti ja odavalt muuta füüsiliseks objektiks [14]. Printimisbetoonis nähakse võimalust vähendada ehituskestust, ehituskulu, materjalijäätmeid ning ehitada ohutumalt, riskivabamalt, väiksema tööjõuvajadusega.

Betooni printimiseks kasutatakse teadaolevalt kahte meetodit, milledeks on:

- 1) kiht-kihile meetod- prinditav konstruktsioon saadaks betoonisegu kiht-kihile laotamisel;
- 2) pritsimismeetod- prinditava konstruktsiooni saamiseks pritsitakse mört surverõhu abil pinnale, kuhu see suure viskoossusse abil pidama jääb. Pakub paindlikumat võimalust armeerimiseks. Kasutatakse konstruktsioonide taastamiseks, tunnelite vooderdamiseks. Miinuseks suur hulk tolmu ning materjalikulu, ei ole nii täpne kui kihiline meetod. [15]

Antud magistritöö raames on kasutatud kihilist meetodit, mistõttu edaspidi keskendutakse sellele.

Kihiliseks betooni printimiseks on võimalik kasutada autorile teadaolevalt nelja erinevat tehnoloogiat.

- 1) *Contour crafting* – printimine toimub arvutiga juhitava kraana või mehhanismi kaudu. Süsteem koosneb karkassüsteemist ja otsikust. Plussiks on protsessi täielik automatiseerimisvõimalus, kuid probleemiks võib kujuneda betooni viskoossuse ühtlase taseme säilitamine, mis on vajalik, et konstruktsiooni pind oleks sile ning konstruktsioon oleks tugev. [16] Antud meetod on sobilik nii suure kui ka väikesemõõtmelise ehitise printimiseks. Tehnoloogia illustratsioon on välja toodud joonisel 1.3.



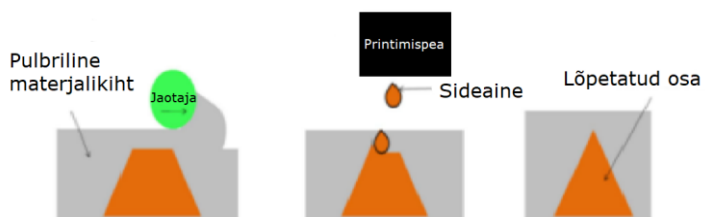
Joonis 1.3 *Contour crafting* tehnoloogia illustratsioon [17]

- 2) *D-Shape* – printimine toimub pukksüsteemil (joonis 1.4). Printimisprotsess seisneb vedela sideainejooa pihustamisel kuivaine materjalikihile. Kuivaine materjalikiht koosneb liivast ja magneesiumoksiidil põhinevast tsemendist, mis segatakse kokku kuivaks seguks enne 3D printerisse panemist ja kihtideks laotamist. Vedel sideaine pihustatakse kuivaine kihtidele, sidematerjal sadestumisel liigub läbi kuivsegu alumise kihini, mille tulemusena kuivsegu seotakse ja need tahkuvad, protsessi kirjeldus on toodud joonisel 1.5. Protsessi korratakse iga kihi puhul kuni struktuuri lõpuni. Ülejäänud sidumata materjal jääb tardunud osadele toeks. Kõigi kihtide summa on sidumata kuivsegu ruumala, mis sisaldab endas prinditud, tardumata osa. Kivistunud objektidelt tuleb puhastada sidumata materjal. Protsess on aeganõudev ja töömahukas, kuid sobib väga hästi keerukate ja ainulaadsete osade valmistamiseks. Joonisel

1.6 on näidatud kuivsegu kiht, millele on peale kantud sideaine ettenähtud kohtadesse. [19]



Joonis 1.4 *D-Shape* printimistehnoloogia [18]



Joonis 1.5 *D-Shape* protsessi põhimõte [18]



Joonis 1.6 *D-Shape* tehnoloogiaga printimine [18]

3) *Robotic Arm Solution* puhul on tegemist kuueteljelise liikumisega 3D-printimissüsteemiga, mis võimaldab printida ka keerukaid kujundeid ning on sobilik lisaks ka renoveerimistöodeks. Üheks oluliseks eeliseks robotkätel on oskus üheaegselt töötada nii printerina kui ka aknaid paigaldada. Robotkäed võivad olla kohtkindlad (joonis 1.7) või mobiilsed (joonis 1.8). Kohtkindlad leiavad kasutust tehastes olles paigaldatud põranda külge kinnitatud metallalusele. Mobiilsetel robotkätel on tänu roomikutele võime liikuda ühest punktist teise, mis on samuti tema eeliseks. Puudusteks antud meetodil on kõrgusesse ehitamise piirang, keerukam programmeerimine ning robotkäel puudub võime enda lähedale printida. [19]



Joonis 1.7 Mobiilne *Robotic Arm* [19]



Joonis 1.8 Kohtkindel *Robotic Arm* [19]

4) *Swarm 3D printing* omapäraks on see, et kasutatakse ühe suure printeri asemel mitut väikest (joonis 1.9). Meetod ei ole väga levinud, kuna väikeste printerite printimisulatus ulatus on väiksem, tehniliselt on keeruline mitut väikest robotid korraga samaaegselt tööle panna ning robotite liikumistrajektoori alla jääv pind peab olema sile ja puhas, vastasel korral liikumiskava läheb sassi. Ei ole sobilik massiivsete elementide printimiseks. [19, 20]



Joonis 1.9 Kaks robotit üheaegselt printimas *swarm 3D* meetodiga [21]

Antud magistritöö raames kasutati betooni printimiseks ABB IRB 6640 M2004 robotit „*Robotic Arm Solution*”.

1.2.1 Kivistumata betooni omadused

Võrreldes tavabetooniga ei pumbata printimisbetooni segu raketisse, vaid laotakse kihilisena üksteise peale. Seetõttu on printitava betoonisegu jaoks olulised erinevad omadused, et printimine toimuks sujuvalt ning saavutada püsiv konstruktsioon. Värske betoonisegu peab olema pumbatav, kuid samas piisavalt kjujuhoidev, et see peale printimispeast väljumist laiali ei valguks. Lisaks peab printitav segu olema piisavalt tugev, et uut kihti peale printides alumised kihid ei deformeeruks, materjali reoloogia muutub seetõttu oluliseks omaduseks.

Printimisbetoon ühendab endas nii torkeet-meetodil pinnale kantava betooni kui ka isetiheneva betooni omadusi. Tavaliselt kasutatakse betoonisegus ka erinevaid lisandeid printimisbetooni omaduste parandamiseks, kuid antud magistritöö raames ei olnud see vajalik, kuna eesmärk oli mõista klaasliiva mõju.

Alljärgnevalt on printitava betoonisegu oluliste omadustega mindud rohkem süvitsi.

Pumbatavus ning töödeldavus

Betoonisegu pumbatavust on võimalik iseloomustada materjali plastsuse ja reoloogilised omadustega. Kõige olulisem parameeter pumbatavuse juures on materjali viskoossus. Printimisbetooni pumpamisel transporditakse materjali ning valmistatakse

ette laotamiseks. Pumpamise etapis ei tohi segu pumba, vooliku või torusüsteemi sees ummistuda.

Üldiselt on printimisbetoon kui viskoplastne materjal. Viskoplastse materjali staatiline voolavuspiir tuleb pumpamise alustamiseks ületada ning edaspidiseks voolamiseks tuleb säilitada viskoosse materjali dünaamilist voolavuspiiri, vastasel juhul mört printimisel rebeneb. Peale segu paigaldamist omandab see taas kõrge plastuse kiiresti. [1, 22, 23]

Pumbatavus on segu võime katkematult printeripeast väljuda, hoida oma kuju korrapärase mõõtmetega ja deformatsioonideta, ilma et kiht lõheneks või rebeneks. [24]

Ruumilise printimisprotsessi saab jagada kolmeks etapiks:

- 1) pumpamine segistist printeripeasse- mida pikem on voolik, seda väiksem viskoosus on vajalik;
- 2) lisandite (peamiselt kiirendite) segamine printeripeas (valikuline)- mida väiksem on segu viskoosus, seda ühtlasemalt lisandid dispergeeruvad;
- 3) mördi ekstrudeerimine printeripeast- voolikust välja tulev mört peab olema suhteliselt plastne, suure staatilise voolavuspiiriga ning võimalikult kiirelt tarduv, et oleks võimalik kihte üksteise peale kanda. Samas tuleb arvestada, et mört peab olema piisavalt töödeldav, et printimine toimuks ühtlaselt ning seejuures printimispea liikumisel mördisegu ei rebeneks. [1]

Arvutustel tuleb arvestada, et printimisbetooni korral mört ei käitu kui homogeenne vedelik. Seda tuleb arvestada nii pumpamisel, segu paigaldamisel kui ka projekteeritava kivistunud betooni omaduste arvutamisel.[25]

Kujuhoidvus

Peale segu pumpamist peab segul viskoosus kiiresti vooluseisundist taastuma, et prinditav segu ei valguks laiali. Viskoosus taastub tänu viskoplastse materjali flokulatsioonile. Fokulatsioon ehk helvestumine on protsess, mille käigus toimub materjaliosakeste vaheline ühinemine ehk kokku kleepumine ning moodustub nõrgalt seotud struktuur. [26] Printimisbetooni segu esialgne jäikus tuleneb fokulatsioonist. Hiljem moodustub kristallstruktuur. [1]

Printimisbetooni puhul on õige veesisaldus veelgi olulisemal kohal kui see on tavabetoonil. Sellest sõltub oluliselt kas printimine kihti kihile õnnestub. Prinditavust parandab segusse täiendava tsemendipulbri lisamine ja peeneteralise täitematerjali kasutamine. Samuti on kiirendajatel positiivne parandav mõju keemiliste reaktsioonide ja hüdratatsiooniprotsessi kiirendamisel, seeläbi saavutatakse suurem varajane tugevus. [24]

Tiksotroopsia on omadus mehaanilisel mõjutusel vedelduda. Projekteeritud segu tiksotroopsus, mis on seotud suurema voolavuse ja väiksema viskoplastilisusega, peab olema kooskõlas pumbatavusenõuete, ekstrusioonikiiruse, struktuurilise ülesehituse kiiruse ja stabiilsuse kaalutlustega.

Kiirus düüsis ja trükitud kihtide pikkus on kaks võtmetegurit, mis mõjutavad 3DPC-komponentide ja -konstruktsioonide valmistamiseks vajalikku aega. Mõnes uuringus on märgitud optimaalseks tsükliajaks 10 minutit, kuna kiirem printimiskiirus võib põhjustada liigseid deformatsioone alumistes kihtides, samas kui hilinevad pealekandmine võib põhjustada külmliidete tekkimist, suuremat tühimike sisaldust kihtide vahel ja/või kihtide delaminatsiooni. [24]

Prinditavus

Prinditavus on kõige olulisem parameeter printimisbetooni segude hindamisel. Prinditavuse all mõistetakse printimisbetooni omadust säilitada kuju, arvestades kõiki prinditud betooni kihte ning nende printimise ebaühtlast vajumist, printimise täpsust, omavahelist naket jms omadusi, mis on iseloomulikud printimisbetoonile.

Tavaliselt kaotatakse kandevõime materjali ebapiisavast tugevusest ja/või 3Dkonstruktsiooni stabiilsuse kadumisest. Mõlemat on seejuure oluline jälgida. Prinditav konstruktsioon peab suutma hoidma oma kuju ilma märgatavate deformatsioonideta ning alumine kiht peab suutma vastu võtta ülemiste kihtide koormust. [24]

Vertikaalselt vabalt seisvate komponentide või seinalaadse konstruktsiooni 3D printimise käigus suureneb mehaaniline pinge alumistele kihtidele kumulatiivse survekoormuse tõttu järk-järgult. See koormus tekitab mingil teataval kriitilisel piiril „elastse paindumise“ (*elastic buckling*) või „plastilise kokkuvarisemise“ (*plastic collapse*). Konstruktsiooni stabiilsuse kadu põhjustab „elastset paindumist“ ning „platsilist kokkuvarisemist“ põhjustab alumise kihi materjali voolavuspiiri ületamine. Mõlemad purunemisviisid on illustreeritud joonisel 1.10. [24]



Joonis 1.10 Vasakul elastne paindumine, paremal plastiline purunemine [24]

Sama uuring [24] kirjeldab, et värsket betooni kivistumise mõju materjali elastsete ja plastsete omaduste muutumisele ajas saame kirjeldada läbi viie parameetri: algelastsusmoodul, Poissoni tegur, esialgne voolavuspää, kivistumiskiirusest tingitud voolavuspää ja kivistumiskiirusest tingitud elastne jäikus. [24]

Kihtide omavaheline nake

Printimisbetooni kihtide vaheline nake on väga oluline, et konstruktsioon oleks püsiv ning kihid töötaksid kui üks tervik. Kihtide vaheline nake sõltub erinevatest aspektidest. Juba koostise valimisel tuleb nakke saavutamiseks arvestada, kuna lisandite kasutamisel võib muutuda alumise kihi nakkuvus. [1] Lisaks mõjutab printimisbetooni veesisaldus samuti kihtide omavahelist naket.

Erinevatel mörtidel on ka erinev vee eraldumise kiirus. Valataval mördil suureneb pinnaniiskuse vee eraldumise tõttu lineaarselt. Printimisbetooni omapäraks on prinditud kihi pinnal toimuv suur pinnaniiskuse vähenemine alguses ning seejärel uus tõusmine. Esialgne pinnaniiskuse vähenemine toimub 2 tera vahele jääva märja „libeda kihi“ aurustumisest, sellele järgnev tõusmine toimub mördist eralduvast veest, mis kompenseerib esialgse aurustumise kiiruse. [27, 1]

Pinnaniiskuse on seotud printimisbetooni kihtide vahelise nakkutugevusega. Kihtide vaheline niiskustase on üks peamisi mõjutavaid tegureid nakkutugevusel. Niiskustaseme ja kihtidevahelise tugevuse vaheline seos on universaalne. Lisaks sõltub väga palju ka printimisprotsessist- kui suur voolik, milline printimispea, kui suure

rõhuga prinditakse, kui kiiresti prinditakse järgmine kiht peale. Viivitusaja suurenedes kihtide omavaheline nakketugevus väheneb, kuna kihtide vahelise kui kihtide tardumisajad üksteisest kaugenevad. [27, 28]

Hüdratatsiooniprotsessiga suureneb pasta plastiline viskoossus kihtide printimise ajal, seega võib vajalik olla printimisel rõhu reguleerimine. Kui reoloogilised omadused ei ole konfigureeritud on materjali voolukiirus ebaühtlane ning siinkohal rõhu reguleerimine ei aita. Joonisel 1.11 a) on välja toodud katsete [23] kasutatud väikesemahuline printer ning b) näitab defektset filamenti tekkimist järsust printeri materjalipealevoolu seiskumisest, c) korral on olnud materjalipealevool ebaühtlane ning joonisel d) on olnud sujuv pealevool, kuid mis kukkus madala tingliku voolavuspiiri tõttu kukkus kokku. [23]



Joonis 1.11 Katsete [23] käigus tehtud fotod. a) katsetes kasutatud laboriprinter; b) filament, mis tekib materjalivoolu järsu seiskumise tõttu; c) ebaühtlane materjali pealevool; d) liiga madala voolavuspingega alumine kiht [23]

Ka [29] katsete tulemusena tõmbetugevus vähenes, kui kihtidevaheline printimise ajavahe suurenes. Kuni 15 minutit intervalliga, oli kihtide vaheline nakketugevus suurem kui materjali tõmbetugevus. 30-minutiline või pikem vahe põhjustas liidese nakketugevuse vähenemist. [29]

Kasutatavusaeg

Peale prinditava betooni flokulatsiooni, mille käigus taastub esmane viskoossus ning millest edasi hakkab tsemendikivi tarduma, peab tardumine algama võimalikult kiiresti.

Mida kiiremini see algab, seda suurema tugevuse on alumine kiht saavutanud vahetult enne pealmise kihi peale kandmist ning ei pea tegema printimises pause. Pauside ära jätmise soodustab nakketugevust kihtide vahel. Mida kiiremini saame uue kihi peale printida, seda väiksem risk on materjali kuivamisele. Materjali kuivamine mõjub negatiivselt kihtide vahelisele nakkele. [1]

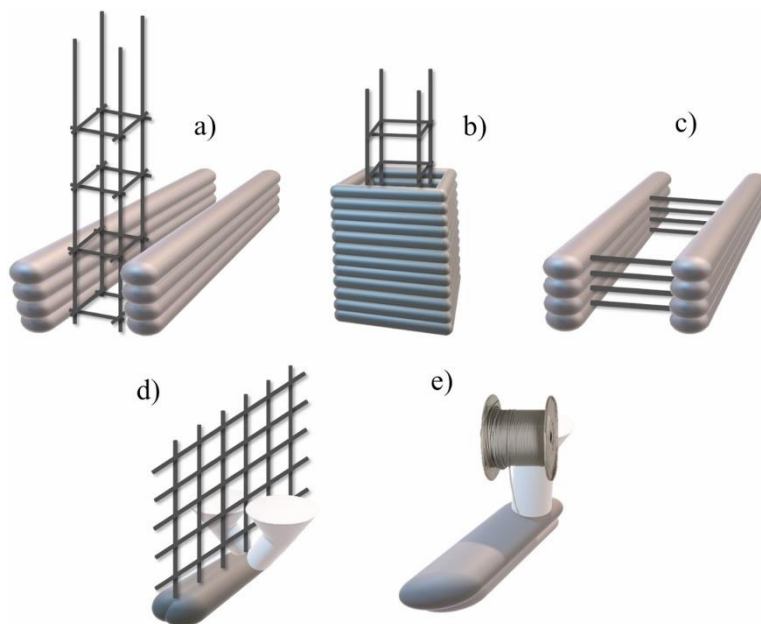
Lisandite kasutamine võimaldab tardumise algust ning mördi kasutatavusaega reguleerida.

Armeeritavus

Kivistunud betoonil on suur survetugevus, kuid kordades väiksem tõmbetugevus. Nagu tavabetoonil nii ka printimisbetooni tõmbekandevõime suurendamiseks tuleks betooni armeerida. Prinditava betooni armeerimisel tekib vastuolu. Armeerimiseks on vajalik piisavalt töödeldav segu, et betoonisegu valguks ümber armatuuri ning nake betooni ja armatuuri vahel oleks tagatud. Samas ei tohi printeripeast väljuv segu olla vedel.

Betooni 3D printimisel üldiselt ei armeerita, kuid vajadusel on võimalik ka printimisbetoonile sisse viia vardad. Hetkel on erinevate armeerimisvõimaluste väljatöötamine endiselt uurimisel, kuid mõningad lahendused on tänapäeval leitud. [23]

- Esimene võimalus selleks printida konstruktsiooni välimine perimeeter, armeerida ning siis tavabetooniga sisu monolitiseerida. Seinade puhul võimalik ka printida välimine külg, armeerida ning siis sisemine külg (Joonis 1.12 a- b). Ehk printimisbetoon töötab alguses kui raketis, kuid hiljem kui osa konstruktsioonist. Nõuded, arvutusmeetodid ja standardid, mille järgi kontrollida milline peab minimaalselt prinditav raketis olema, hetkel puuduvad. Tuleb kontrollida katselist.
- Teine võimalus on kohe pärast printimist igasse kihti käsitsi paigaldada horisontaalsed armatuurvardad ning hiljem printimisbetooni kihtide vaheline ala monolitiseeritakse tavabetooniga (Joonis 1.12 c).
- Kolmas võimalus on paigaldada esmalt armatuurvõrk ning printida armatuurvõrgu ümber spetsiifilist hargnevat düüsi kasutades (Joonis 1.12 d).
- Neljanda võimalusena on painduva tugevdustraadi kasutamine armeerimiseks, mille paigaldamine toimub paralleelselt printimisega (Joonis 1.12 e). [23]



Joonis 1.12 Printimisbetooni armeerimise võimalused a,b) välise perimeetri printimine, vertikaalselt paigaldatud armatuur, c) horisontaalsed vardad kihtide kaupa, d) eelnevalt paigaldatud armatuurvõrgu kasutamine, e) tugevdustraadiga üheaegne armeerimine printimisel [23]

1.2.2 Kivistunud betooni omadused

Kivistunud printimisbetooni puhul on olulised üldiselt samad omadused, mis tavabetooni korralgi, kuna kasutusala on võrdväärne. Betooni omadused sõltuvad betoonisegu koostisest, selle paigaldamise, tardumise ja kivinemise keskkonnast, tehnoloogilisest valikust ja tihendamise kvaliteedist. Printimisbetooni puhul sõltub kivistunud betooni omadused palju ka printimistehnoloogiast ning printerist endast- kui suur ajavahemik on olnud kihtide üksteise peale kandmiselt, kas otsik on ristkülikukujuline või ümmargune- kui suur on kontaktpind jne [28]

Betooni 3D-printimist peetakse potentsiaalseks viisiks tuleviku ehitusel. Kogu protsess tugineb aga paljudele parameetritele, mis võivad avaldada märkimisväärset mõju trükitud konstruktsioonide pikaajalisele püsivusele, eriti kuna need võivad potentsiaalselt väliskeskkonnaga kokku puutuda. Erinevatest teostatud katsetest saame järeldada, et printimisel iga väike detail mängib tunduvalt suuremat rolli kui normaalbetoonil.

Alljärgnevalt on toodud täpsemalt kivistunud betoonile olulistest omadustest.

Tihedus

Tihedus on füüsikaline suurus, mis näitab aine massi ruumalaühikus, arvestades seejuures materjalis esinevat niiskust ning poore.

Erinevalt tavalisest betoonist, mille segu kavandamisel lähtutakse peamiselt konstruktsioonide tugevusest ja vastupidavusest, on printimisbetooni segu kavandamisel täiendavaid erinõudeid nii värskes kui ka kivistunud olekus. Ekstrudeeritud printimisbetooni komponentidel trükitud kihtide või horisontaalselt kõrvuti asetsevate filamentide vahelistes piirides nõrgemad kohad. 3DPC ortotroopse käitumise tase on otseselt seotud „pooride morfoloogia, suhte, suuruse ja jaotusega“. Kihtide liitekohas on suhteline poorsus suurem, kui tavalisel normaalbetoonil, kuid üldine tihedus on neil betoonidel samas suurusjärgus. [24]

Vastavalt teadustööle [24] saadi 120 mm kuubikute tihedusi võrreldes printimisbetooni keskmiseks kuivtiheduseks (2201 kg/m^3), sama seguga normaalbetoonikehadest kuubikutest saadi tulemuseks (2114 kg/m^3). Sellega seoses on teadlased püüdnud kvantifitseerida anisotroopiat, mida trükkimisprotsess avaldab kõvastunud komponendile [24]. Katsete [29] teostamiseks lõigati printimisbetoonist ning valati normaalbetoonist 100 mm kuubikutest katsekehad. Tulemusena saadi normaalbetooni tiheduseks $2250 \text{ (kg/m}^3)$ ning hästi trükitud betoonidel $2350 \text{ (kg/m}^3)$. Seega hästi prinditud betooni puhul on tihedus mõnevõrra suurem. See võib tuleneda sellest, et pealmiste kihtide peale printimisel alumised tihenevad.

Antud magistritöös kasutatav klaasliiv vähendab tihedust oma suletud pooride tõttu.

Poorsus

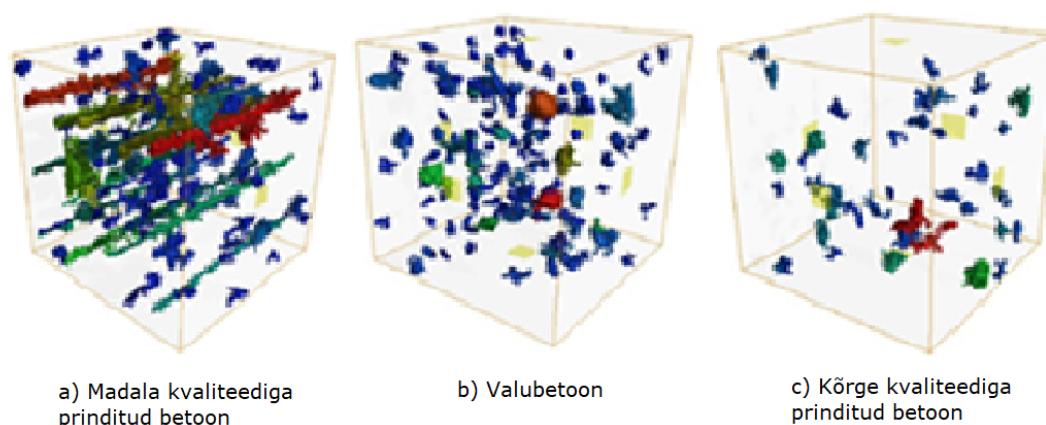
Mida poorem on betoon, seda väiksem on tema tihedus ning kandevõime. Poore on kahte sorti:

- 1) manustatud poorid, mis tõstavad külmakindlust ja parandavad töödeldavust;
- 2) mittesoovitud poorid, mis tekivad vabast veest, kaasatud õhust, ja mis vähendavad külmakindlust, tihedust, tugevust.

Vastavalt uuringule [30] on printimisbetooni poorsus kõrgem ja poorid on väiksemad võrreldes tavabetooniga. Prinditud proovide puhul täheldati, et tühimikud olid ühtlaselt piklikud horisontaalsuunas ja lamedad vertikaalses printimise suunas, samas kui valatud proovid on pressitud valusuunas. Seega pumpamisprotsessi poolt esile kutsutud

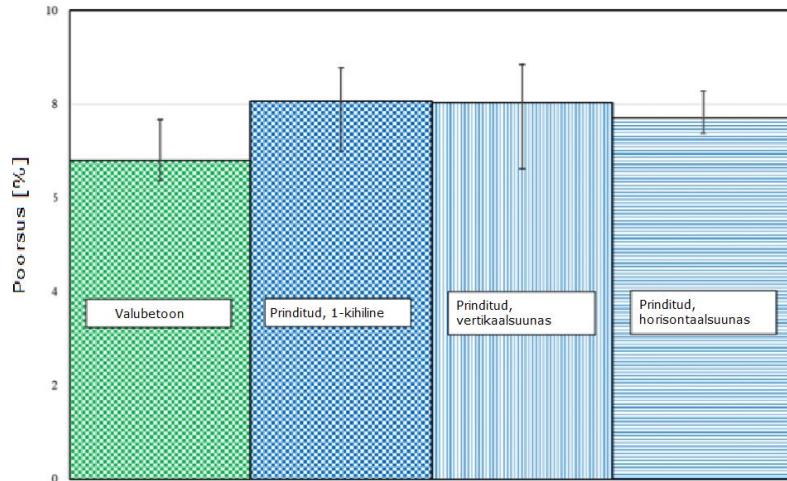
hüdrauliline rõhugradient ühtlustab ja pikendab eelisjärjekorras tühimikke horisontaalsuunas, samas vertikaalses suunas poorid surutakse/pressitakse kokku peale kantava kihi tõttu. Peale kantav kiht toimib tihendajana. [30]

Erinevust pooride osas kinnitavad ka artiklid [24], [29] ja [31]. Võrreldes tavabetooniga on printimisbetoonis poorid ebaühtlasemalt jaotunud, kuna kihtidevahelistes liidetes esineb suurem poorsus. Mõlemad artiklid kinnitavad ka õhupooride kuju, mis on enamasti sfäärilised, trükkimisorientatsioonis piklikud, lapikud või ellipsoidsed ning nende jaotumine erineb oluliselt vormivalu betooni sfäärilistest pooridest (joonis 1.13). [24] Katsete [29] tulemustena saadi hästi trükitud betoonil oluliselt vähem tühimikke, mille läbimõõt oli suurem kui 0,2 mm (1,0%), võrreldes vormi valmistatud betooniga (3,8%). Samas ebakvaliteetselt trükitud materjali proovides oli tühimikke rohkem (4,8%). [29]



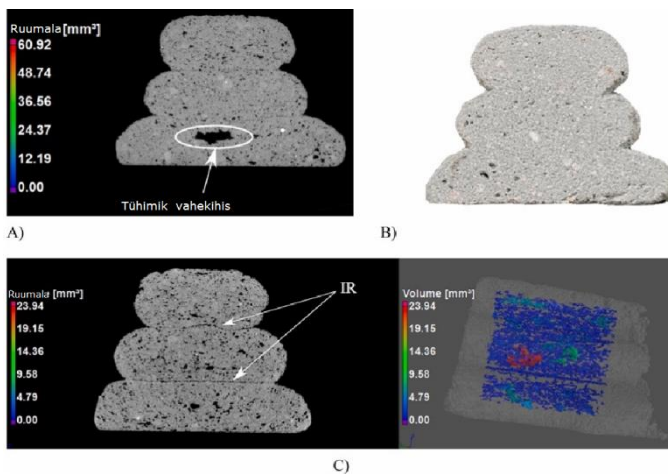
Joonis 1.13 Erineva meetodiga valmistatud katsekehade poorsus [24]

J. Krugeri uuringus [31] valatud ning 3D-prinditud betooni katsekehade poorsuste tulemused on esitatud joonisel 1.13. Minimaalsed ja maksimaalsed mõõdetud väärtused on näidatud vertikaalsete joontega algus ja lõpp punktidega. Need tulemused on soovituslikud, kuna proovid võeti betoonist juhuslikult valitud kohtadest ja need ei pruugi üldiselt näidata betooni põhiomadusi. [31]



Joonis 1.14 Uuringu [31] katsekehade poorsuse tulemused

Joonisel 1.15 on näha, et kuigi võiks arvata, et printimisbetoon on homogeenne, siis tegelikult see nii ei ole [31].



Joonis 1.15 A) VEL-proovi CT-pilt, mis näitab suurt kihisest tühimikku, mis asub vahetult vahekihi all, B) läbilõikefoto VEL-proovist, mis oli saetud, ja C) VEL-proovi CT-läbilõikefoto ja 3D-poorsuse render [31]

Teadusartikkel [33] leidis, et printimisbetooni kihtidevahelisel nakketugevusel on otsene seos printimise ajaintervalliga. Mida kiiremini järgmine pealmine kiht prinditakse, seda väiksem on poorsus. Lisaks tuleks segamisprotsessi pikendada, et vähendada värskesse segusse jäävat õhku. See võib potentsiaalselt vähendada printimisbetooni üldist poorsust, mis võib järeltulekult parandada keemilist, happe-, sulfaadi-, karbonisatsioonikindlust ja soojustakistust. [33]

Tugevus

Betooni puhul määratakse 28 päeva vanuselt normaaltingimustel kivistunud 15 x 15 x 15 cm katsekehade järgi tugevusklass, mis on tagatud tõenäosusega 95 %. Betooni tugevus oleneb:

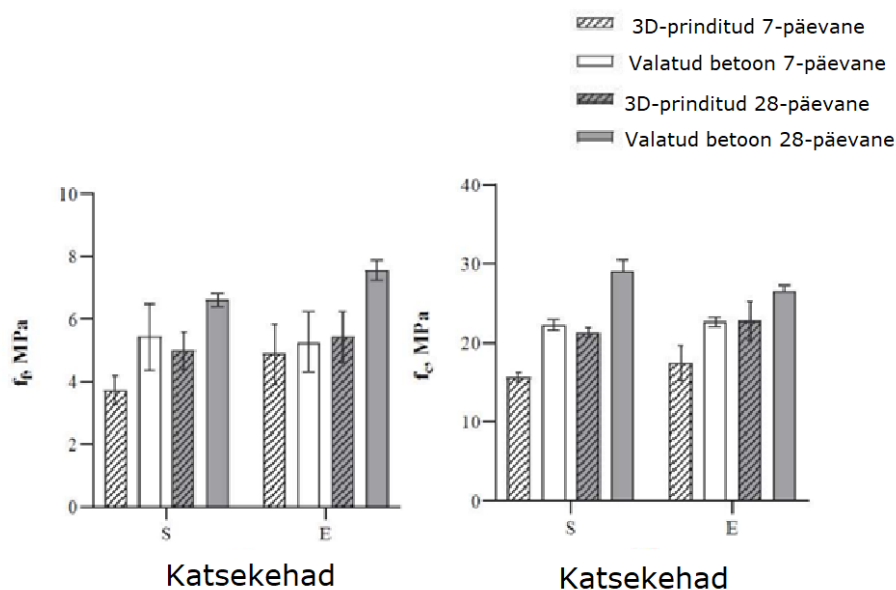
- 1) kivinemiskeskonnast, ei tohi liiga vara välja külmuda;
- 2) kasutatud tsemendi tugevusest;
- 3) vesitsementtegurist;
- 4) täitematerjali tugevusest;
- 5) täitematerjali puhtusest;
- 6) tsemendi kivistumise kiirusest;
- 7) täitematerjali terastikulisest koostisest;
- 8) täitematerjali tera pinnast, päritolust, kujust jms;
- 9) paigaldamismeetodist;
- 10) betoonisegu koostisest.

Võrreldes tavabetooniga on printimisbetooni puhul lisaks oluline ka kihtidevaheline nakketugevus, millest sõltub suurel määral konstruktsiooni kui terviku tugevusnäitajad.

Printimisbetoon on anisotroopse käitumisega, seda nii surve- kui paindetugevuse puhul. Kui tavabetoon on suhteliselt homogeenne materjal, siis printimisbetooni puhul muudab kihtidevaheline liides printimisbetooni heterogeensemaks. Prinditud betooni tihedus on üldiselt suurem tavabetoonist, kuna ekstrusiooniprotsessil toimuvale tihendamisele.

T.T. Le teadusartiklis [29] võrreldi tavabetooni kivistunud omadusi printimisbetooni omadega. Survetugevuse katsed teostati 100 mm kuubikutega, mis printimisbetooni puhul lõigati välja suuremast kehast, valatud betooni puhul kasutati vastavate mõõtmemetega vorme. Paindetugevuse jaoks kasutati 100 mm kuupe ning 100 x 100 x 400 mm prismasid. Tulemusena saadi, et normaalbetoonide katsekehade tugevusnäitajad (survetugevus 107 MPa, paindetugevus 11 MPa) on paremad kui prinditud betoonil. Lisaks prinditud betooni katsekehade tugevusnäitajad (survetugevus 75- 102 MPa, paindetugevus 6- 17 MPa) sõltusid katse suunast, valatud betooni tulemused olid igas suunas võrdväärsed. Järgmise kihi peale printimisel kihtide vaheline nakketugevus vähenes aja suurenedes (2,3- 0,7 MPa). Teadusartiklis [32] võrreldi samuti prinditud betooni surve- ja paindetugevust. Seda tehti 7 ja 28 päeva vanustel

katsekehadel. Tulemused on esitatud joonisel 1.16, milledest saame teha samad järeldused nagu uuringus [29].



Joonis 1.16 7- ja 28- päevaste katsekehade paindetugevuse (vasakul) ja survetugevuse (pareml) tulemused [32]

Ka teadusartikkel [24] toob välja, et printimisbetoonil on suurim survetugevus väljapressimissuunas ning kahes ülejäänud suunas saadi 60- 80 % tugevust. Samas valatud betoonil on igas suunas üldiselt samad omadused. [24]

Vastavalt silindriliste katsekehadega läbiviidud katsete tulemusetele [33] erinesid oodatust. Hetkel puuduvad standardid ning arvutusmeetodid printimisbetooni tugevuste välja arvutamiseks projekteerijatele. Kuid printimistehnoloogia on automatiseeritud ning katsed on identselt korratavad, mistõttu tuleks teha katselist kontrolli. [33] Hetkel ei ole printimisbetooni konstruktsioonilise toimivuse katsetamist erinevates pingetingimustes veel piisavalt uuritud ning puuduvad ka standardid ja arvutusvalemid. Lisaks ei ole välja töötatud tõhusat tugevdamise meetodi, mis on samuti takistuseks teadusuuringute mahajäämusele, et teha uuringuid täismõõdus talade, sammaste, monteeritavate paneelide jne. konstruktsiooni toimivuse kohta. [24]

Printimisbetooni tugevusomadusi mõjutab lisaks komponentide kihilise struktuuri anisotroopsusele ka printimise üksteise peale laotamise/kandmise täpsus, mis võib survetugevust kuni 30% vähenedada. [29]

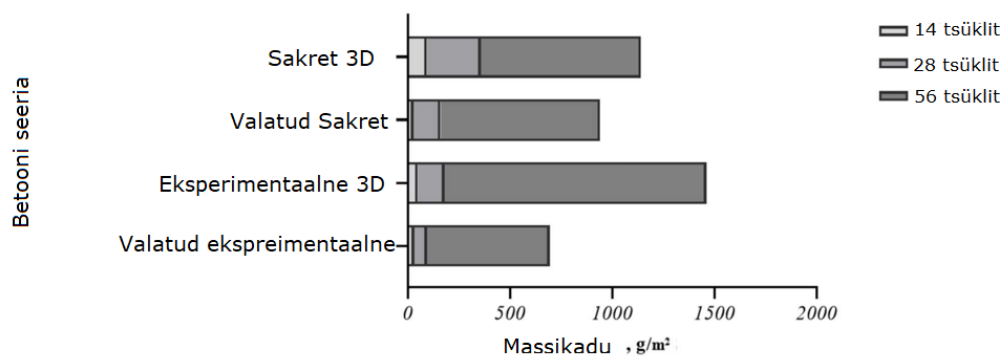
M. Nodehi uuringus [33] vaadeldi kihtide vahelise printimise aja mõju katsekehade lõhestus- ja paindetugevusele. Intervallideks valiti: viisteist sekundit, tund aega, neli tundi, seitse tundi, kakskümmend neli tundi ning normaaltingimustel valmistatud 28 päevased katsekehad. Mida pikem on periood kahe kihi printimise vahel, seda väiksem paindetugevus ja tõmbetugevus on betoonil. [33]

Külmakindlus

Külmakindlus on materjali omadus vastu pidada vahelduvate külm-sula tsüklitele. Iseloomustatakse vee või soola lahusega immutatud betooni vastupanu tsüklite arvuga. Määratakse pinnalt irdunud materjali kao kaudu mingi kindla arvuga tsüklite läbimisel. Materjal irdub, kuna külmudes vedelik paisub, mistõttu tekib pooride sisepindadele kahjustusi. Betooni tekivad sisepingetest praod, tugevus langeb. Külmakindlus on näitaja, mille tulemus sõltub kuidas katset tehti- milline oli temperatuur ja külmutamise kiirus. Põhjuseks on erinevate suurustega poorid betoonis, mille kapillaarjõud on erinevad, seega toimub erinevates poorides vee aurustumine ja külmumine erinevatel temperatuuridel.

Kuna 3D-prinditud betoonpindu jäetakse ka avatuks agressiivsetele keskkonnatingimustele, on külmakindlus selliste konstruktsioonide puhul eriti oluline. Artiklis [32] on uuritud printimisbetooni mõju külmakindlusele. Tehti 3D-prinditud betooni ja sama segu valatud betooni katsekehadele külmutamis-sulatustsüklit, et hinnata printimise mõju. Seejuures katsetes kasutatud betoonisegudes ei esinenud spetsiaalseid lisandeid. Seega saab E. Spurina saadud tulemusi kasutada edaspidi lähtepunktina. [32]

Printimisbetooni massikao iseloom nii prinditud kui ka valatud betoonidel on sama. Kuid vastavalt joonisele 1.17 on näha, et peale 56 tsüklit on prinditud betooni katsekehade irdunud materjali hulk tunduvalt suurem. Tulemuste kinnitamiseks on vaja läbi viia täiendavaid katseid. [32]



Joonis 1.17 Massikadu valatud ja prinditud betoonidel peale 14, 28 ja 56 külmumisulatomistsüklit [32]

Püsivus

Betooni püsivuse ehk kestvuse all mõistetakse betooni projekteeritud näitajate säilimist kasutustingimustes. Püsivust vaadeldakse kahest aspektist:

- 1) Betooni lagunemistunnusteta püsimine koostisosade vaheliste sisemiste lagunemisprotsesside vältimise kaudu;
- 2) Pikaajaline püsivus agressiivses keskkonnas. [3]

Püsivus sõltub tsemendi ja lisandite, paigaldamise ja kivinemistehnoloogia valikust. Lisaks printimisbetoonil veel printimise kiirusest, kihi paksusest ja laiuusest. Printimisbetoonile omane anisotroopsus on üks peamisi vastupidavuse vähendajaid. Anisotroopsus põhjustab segumaterjalide ebaühtlase kiirusega printimine, pooride kontsentratsioonist, seda just eriti kihtide vahel. Täiendava tsemendi või lisandite kasutamisel on märkimisväärselt positiivne mõju printimisbetooni keemilisele, happe-, sulfaadi-, karbonisatsiooni- ja termilisele vastupidavusele. Siiski tuleks neid kasutada prinditavate reoloogiliste parameetrite alusel, nagu plastiline viskoossus ja materjali voolavuspiir. [33]

Mahumuutused

Mahumuutused olenevad kivistumistingimustest, betooni niiskusest ja koostisest. Need on põhjustatud erinevatest hüdratatsiooni-tardumise-kivinemise reaktsioonidest ning neile järgnevale kuivamise protsessidest. Mahumuutuste põhjused on järgnevad:

- esimese ööpäeva jooksul toimub vee sidumine betoonisegu teiste koostisosadega ning vaba vee aurustumine;
- sideaine ja vee vahel toimuv eksotermiline reaktsioon;
- betoonisegu komponentide vahel toimuvad keemilistest ja struktuursed protsessid, mis ei sõltu vee aurustumisest. [3]

Kuivamiskahanemine avaldab kõige suuremat mõju betooni mõõtmete muutumisele ning tekkivate sisepingetest pragude tekkele. Paigaldatud betooni pinnalt toimub vee aurustumine, mis sõltub keskkonnatingimustest- õhu liikumine, temperatuur, õhu niiskus, ja mille asemele liigub vesi betooni sisemistest kihtidest.

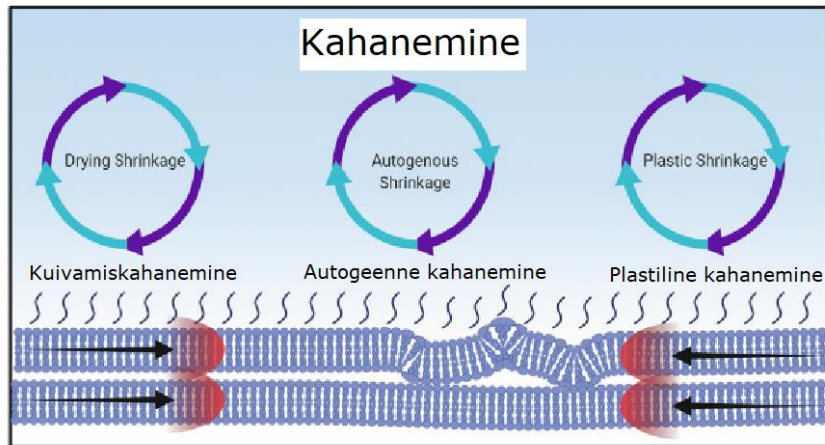
Printimisbetooni puhul võib raketise puudumine ja värskelt prinditud materjalide võimalik segrementeerumine märkimisväärselt suurendada 3D- prinditud materjalide mahukahanemisi. Printimisbetoonis kasutatakse suuremas koguses tsementi ning peentäitematerjali, seega on võrreldes normaalbetooniga suurem täitematerjalide teradepindala, mis põhjustab suuremat reaktsioonivõimet ja eksotermiat. Praod mahukahanemisest võivad tekkida juba 2 tundi pärast printimist. Printimisbetooni puhul on kõige levinumad mahukahanemise tüübid autogeenne, plastiline ja kuivamisest, mis on näidatud joonisel 1.18. [33]

Autogeenne kahanemine on seotud tsemendimaterjali hüdratatsioonireaktsioonidega. Reageerinud materjali maht on väiksem ning see tekitab sisepingeid materjalis endas, mis tekitab pragusid. Kõige rohkem mõjutab autogeenset mahukahanemist temperatuur ja niisuks, sideaine ja lisandite suhteline sisaldus ning sisemine kivinemine. Mida rohkem tsementi, seda suuremad mahukahanemised. Autogeenne kahanemine on printimisbetooni peamisi mahukahanemise põhjuseid. Kogu mahukahanemisest võib olla kuni 30% sellest tingitud. [33]

Kuivamiskahanemine on tingitud kapillaarpooridest ning betoonis sisalduva vaba vee aurustumisest. Peatükk 1.1.4 puudutab kuivamiskahanemisest, valatud ning printimisbetoonil on kuivamiskahanemine samaväärne.

Plastiline mahukahanemine on seotud betooni niiskuskahuga ning mahu kahanemisega juba enne tardumise algust. Plastiline mahukahanemine on nihkepingete kontsentratsiooni peamiseks põhjuseks printimisbetooni vahekihtides. Suure plastilise mahukahanemise tagajärjeks võib olla kihtide üksteise pealt libisemine ebaühtlase poorivee aurustumise tõttu. Mõjutab peamiselt kihtidevahelist nakketugevust. [33]

Mahukahanemiste vähendamiseks tuleb valida õige lisandite kombinatsioon, optimeerida vesi-tsementtegur ning liiva ja sideaine suhe, vältida liiga kõrget temperatuuri tardumisel ja kivinemisel ning hoida betoon niisutatuna.



Joonis 1.18 Printimisbetooni tüüpilised kahanemistüübid [33]

2. TAVA- NING KLAASLIIVAGA BETOONI SÜSINIKU JALAJÄLJE VÕRDLUS

Nii nagu kõikjal mujal maailmas, on ka Eestis ehitusel CO₂-le oluline mõju. Ehitustööstus tarbib 33- 38 % kogu maailmas kasutatud energiast ning moodustab ~15% otsesest CO₂ heitmest. Toorme hankimisega betoonitööstusele on seotud umbes 85% maailma kaevandustegevusest. Mure inimtegevuse keskkonnamõjust on viimasel kahel aastakümnel olnud enamik ülemaailmsel kohtumistel ja konverentsidel esiplaanis. Tänapäevaks on sõlmitud erinevaid kokkuleppeid ja määruseid. [24] Otsitakse keskkonnasäästlikumaid alternatiive ning püütakse järjest enam taaskasutada võimalikult palju, et vähendada prügi teket.

Levib uskumus, et betooni printimine on keskkonnasäästlikum ning vähendab CO₂e¹ heidet võrreldes normaalbetooniga lausa 50 % võrra. Printimisbetoon võimaldab meil hoida kokku materjalikasutusest ning vähendada sealhulgas materjalijäätmeid. Lisaks toimub printimismeetodil ehitus hulga kiiremini ning keerulise kujuga konstruktsioone saab hõlpsalt valmistada, seejuures raketist ei ole tarvis. Eelistades printimistehnoloogiat tavalisele betooni valamisele muutub väiksemaks sõltuvus tööjõust ning paraneb betoonkonstruktsioonide tootlikus. [24]

Ka klaas on väga populaarne materjal. Igal aastal toodetak üha rohkem klaastooteid, mistõttu ka klaasjätmete hulk kasvab. Klaas on biolagunematute omadustega, Austraalias tekkis ~1,6 miljonit tonni klaasijäätmeid 2018- 2019. aastal, millest taaskasutati ~59 %. Klaasi füüsikalised omadused ning keemiline koostis sarnaneb betooni tooraine omadega, mistõttu nähakse klaasliiva kasutamisel kvartslüüa asemel betoonis potentsiaalset alternatiivi. [24]

Printimise negatiivseks mõjuks on suurem tsemendivajadus segus kui tavabetooni. Ning tsemenditööstus on peamised põhjused miks ei ole betoon nii keskkonnasõbralik kui pealtnäha tundub. Lisaks on kindlasti vaja paisutatud klaasekergetäitematerjaliga betoonisegu puhul kasutada lisandeid. Kasutades betoonisegus taaskasutatud materjale, siis võiksime suurenenud tsemendi osakaalu negatiivset mõju „pehmedada“. Kasutades betooni printimisel paisutatud klaasekergetäitematerjali, muudab see printimisbetooni keskkonnasõbralikumaks ja aitab vähendada betooni sõltuvust looduslikust ressursist, vähendada prügilates klaasijätmete osas ruumi, mida on maailmaruumis siiski piiratud koguses.

¹- e märgib ekvivalenti ehk hinnatud on kõik kasvuhuonegaasid läbi süsiniku. Kasvuhuonegaasidel on erinev globaalse soojenemise potentsiaal. Näiteks: 1 g süsinikku= 1 g süsinikku, 1 g metaani= 28 g süsinikku ekvivalentina.

Tsemendipõhine 3D printimine on arenev tehnoloogia, mis on praegustest tsemendisektori dekarboniseerimise tegevuskavadest välja jäetud, kuid mille artikli [34] kohaselt on potentsiaal lahendada uutes ehitistes sisalduvad süsinikku. Heitkoguste vähendamine võrreldes tavaehitsuega toimub maksimaalselt, kui printitakse keerukaid ja/ või ainulaadseid ehitisi. Lisaks globaalse soojenemise probleemi leevendamisele on printimisel potentsiaal vähendada ka muid kahjulikke mõjusid, nagu eutrofeerimine, hapestumine, fosfiilkütuste ammendumine ja sudu teke. [34] LCA uuringus, milles uuriti heitkoguseid 1 m² kandva seina tootmisest kuni ehitusetapini, leiti, et printimisbetoonil on tavapärase ehitusega võrreldes madalam kasvuhoonegaaside heitkogus, välja arvatud juhul, kui lisatugevdusi paigaldati käsitsi hoonele [35].

Antud magistritöös kasutatud paisutatud klaasliiv on toodetud klaasijäätmetest, mille tootmisprotsessist ei eraldu mürgiseid gaase ega aineid [8]. Kuna tootmisprotsessis toimub siiski klaasjäätmete kuumtöötlemine, siis selle mõju keskkonnajalajäljele tuleks veel täiendavalt uurida.

2.1 Süsiniku jalajälje arvutus katses kasutatud betoonisegudele

Ehituse hindamine vajab ehitusinfo modelleerimist nii, et oleks võimaldatud koostada kasutatud või kasutatavate materjalide loetelu. Antud peatükis on uuritud, millist mõju klaasliiv

Andmed tavaliiva EPD kohta tulenevad allikast [36].

- EPD ehk toodete keskkonnadeklaratsioon

Emissioon= emissioonitegur x materjalikogus

Arvutuste põhimõte seisneb selles, et autor uurib, millist mõju avaldavad erinevad segud keskkonnale. Arvutused tehakse 1 m³ betooni koguse peale, kuna ehituses betooni tellides räägitakse m³ arvust. Arvutused teostatakse valemiga:

$$A1 + A2 + A3 \quad (2.1)$$

kus: Kus A1- iseloomustab toormaterjalide kaevandamist;

A2- transporti tootmisesse;

A3- tootmist ja pakendamist.

Kvartsliiduga emissioonitegur t kohta

Vastavalt allikale [36]:

- $A1 = 1,85 \times 10$ (kg CO₂-ekv);
- $A2 = 3,83$ (kg CO₂-ekv);
- $A3 = 2,47 \times 10^{-2}$ (kg CO₂-ekv);
- süsiniku jalajälg tonni kohta: 22,35 (kg CO₂-ekv).

Klaasliiduga emissioonitegur t kohta

Vastavalt allikale [36]:

- $A1 = 0$ (kg CO₂-ekv) ;
- $A2 = 3,83$ (kg CO₂-ekv);
- $A3 = 2,47 \times 10^{-2}$ (kg CO₂-ekv);
- süsiniku jalajälg tonni kohta: 3,855 (kg CO₂-ekv).

Tsemendi emissioonitegur t kohta

Allikas [37] kohaselt

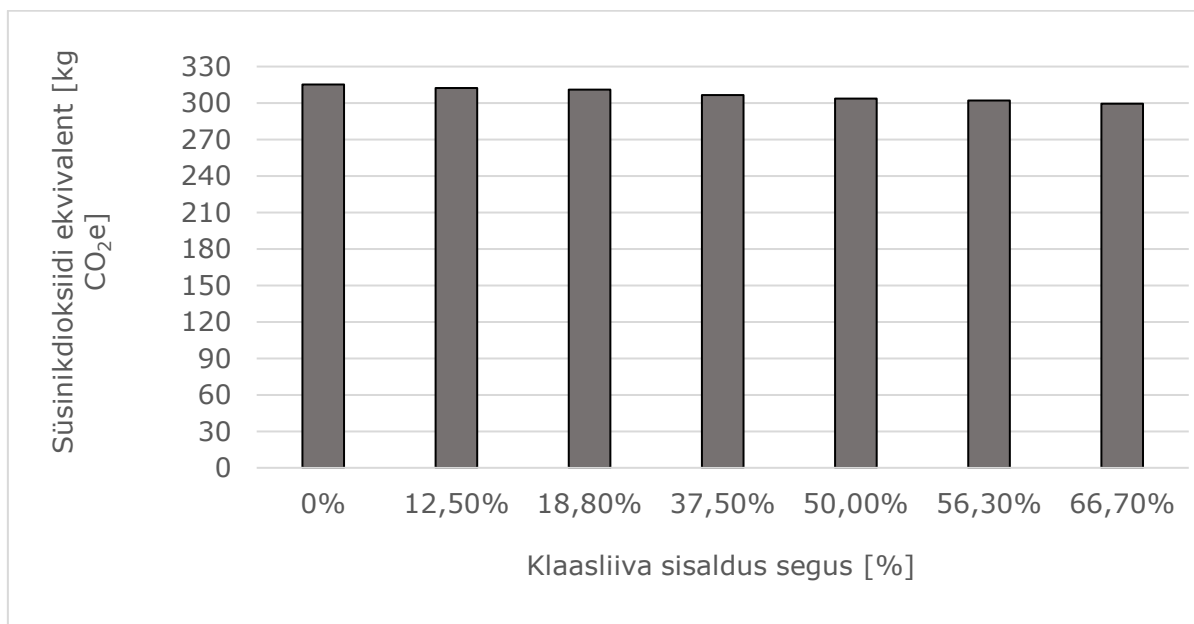
- Süsiniku jalajälg tonni kohta: $8,08 \times 10^2$ (kg CO₂-ekv).

Tulemus järeldustega

Täpsem arvutustabel on esitatud lisa 1, mille põhjal on tehtud graafik (joonis 2.1). Segude arvutuste lõpptulemused on esitatud tabelis 2.1.

Printimisbetoon vajab suuremal hulgal tsementi kui tavabetoon ning tsemendi tootmisest ja transpordist on süsiniku jalajälg võrreldes kvartsliiduga on 36 korda suurem ning klaasliiva tootmisest ja transpordist 209 korda suurem. Mistõttu vaatamata klaasliiva üle 5 korra väiksemale EPD arvule, võrreldes kvartsliiduga, liiva vahetamine printimisbetoonisegus süsinikdioksiidi jalajälge märgatavalt ei vähenda. 1 m³ peale segus, kus on klaasliiva sisaldus 66,7%, väheneb süsinikdioksiidi ekvivalent 15,8 (kg CO₂e) võrra, mis moodustab 5% kogu segu süsinikdioksiidi ekvivalentist. Asendades pool segaliiva kogusest klaasliiduga vähendame oma ehitise 1 m³ koguse betooni peale

kasvuhoonegaase 11,7 (kg CO₂e) võrra, mis moodustab 3,7 % süsinikdioksiidi ekvivalentist.



Joonis 2.1 Erinevate segude süsinikdioksiidi ekvivalent

Tabel 2.1 Segude süsinikdioksiidi ekvivalentid

Segu nr	Kood	Klaasliiva % segaliivast	Kokku [kg CO ₂ e]
1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	0	3,15E+02
2	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	12,5	3,12E+02
3	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	25	3,09E+02
4	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	37,5	3,07E+02
5	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	50	3,04E+02
6	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	18,8	3,11E+02
7	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	37,5	3,07E+02
8	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	56,3	3,02E+02
9	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	66,7	3,00E+02
10	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	12,5	3,12E+02
11	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	25	3,09E+02
12	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	37,5	3,06E+02
13	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	50	3,03E+02
14	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	12,5	3,12E+02
15	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	25	3,09E+02
16	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK	37,5	3,07E+02
17	50PL-0KL-0PK-50KK-0JK	50	3,04E+02

3. KATSELINE OSA

Magistritöö eesmärgiks oli uurida kvartslüiva asendamise mõju betoonile ning keskkonnale.

Betooni 3D-printimine on erinevatest etappidest koosnev terviklik protsess. Protsess koosneb segamisest, pumpamisest, printimisest ehk segu printeri peast väljutamisest ja üksteise peale laotamisest vastavalt kuidas on programmeeritud. Kogu printimise protsess seab betoonisegule erinevaid nõudeid ja ootusi.

Sobiva betoonisegu omadusi käsitletakse eespoole põhiosas. Lisaks uuriti kivistunud printimisbetooni omadusi võrreldes sama segu valatava betooniga. Segu peab printimiseks olema esialgu pumbatav, kuid pärast printeripeast väljumist kiiresti tarduma, et oleks võimalik kihte üksteise peale printida, et tekiks võimalikult homogeensete omaduste terviklik konstruktsioon. Töötava konstruktsiooni saamiseks tuleb lisaks kujuhoidvusele arvestada ka alumiste kihtide materjali voolavuspiiri.

Antud magistritöös uuritakse paisutatud klaasliivaga betooni omadusi kvartslüivaga võrreldes. Lisaks oli plaanis uurida ka printimisbetoonile mõju avaldamist mehaanilistele omadustele ning printitavusele üldiselt. Betooni printimine tehnilistel probleemidel ebaõnnestus.

Katselises osas uuriti erinevate liivade puistetihedusi, klaasliiva mõju mördi ning kivistunud katsekehade tihedusele, sobiliku mördi veevajadusele, segu tardumise algusele, katsekehade surve- ja paindetugevusele. Lisandeid seejuures ei kasutatud, et need ei saaks mõjutada tulemusi.

3.1 Lähteandmed

Magistritöö katseline osa lähtus paljuski kahest allikast:

1. M. Pogga magistritööst [1];
2. magistritöö juhendajate kogemusest koguste osas.

Antud töö raames katsetatud etalonsegu koostis kvartslüivaga on tehtud samuti lähtuvalt M. Pogga magistritöö etalonsegule, erinevus seisneb tsemendi valikul. Pogga magistritöö etalonsegu koostise arvutusest sai autor, et kasutati 74,7% täitematerjali ning 25,3% liiva. Ümardades antud tulemusi lähtuti täitematerjali-tsemendi mahulisest suhtest 3:1.

Segu koguste arvutamiseks kasutatud kvartslüiva puistetiheduse andmed pärinevad M. Pogga magistritööst. Klaasliiva puistetiheduste andmed pärinevad klaasliiva tootja Strikloporas kodulehelt.

3.2 Katseplaan

Magistritöö katsete eesmärgiks oli uurida kvartslüiva asendamise mõju erinevate fraktsioonide ja suhetega klaasliivaga.

Katseplaan nägi ette:

- 1) Katsete ettevalmistus:
 - a. Kuivsegude koguste arvutus;
 - b. Kuivsegude valmistamine;
- 2) Veevajadusekatsete läbiviimine
- 3) Konsistentsi kao katse
- 4) Liivade terastikulise koostise määramine
- 5) Kätsi valmistatud katsekehade katsed:
 - a. Katseprismade valmistamine
 - b. 7-päevaste katsekehade survetugevuskatse
 - c. 21-päevaste katsekehade paindetugevuskatse
 - d. 21-päevaste katsekehade survetugevuskatse
- 6) Printimisbetooniga katsed
 - a. Segude valik ning kuivsegude ettevalmistus
 - b. Printimine
 - c. Printimisbetooni katsetamine

Katsed viidi läbi vastavalt nende ajal kehtinud standarditele. Täpsemad katsemetoodikad on kirjeldatud järgnevides peatükkides.

3.3 Katsemeetodid

3.3.1 Katsetes kasutatavad materjalid

Katsetel kasutatud materjalideks olid:

- 0,0...0,5 mm ja 0,5...1,2 mm fraktsiooniga kvartslüiv ettevõttelt EMG Kuiv Liiv OÜ (edasipidi *Li*);

- 0,5...1,0 mm; 1,0...2,0 mm ja 2,0...4,0 mm fraktsiooniga paositatud klaasliiva graanuleid (edaspidi *KI*) ettevõttelt Stikloporas;
- Kunda Nordic Tsement AS komposiittsement CEM II/A-M(T-L) 42,5R (edaspidi *tsement*).

3.3.2 Kuivsegude materjalikoguste arvutuskäik

Partii koosneb erinevatest liivadest, millel on lisaks erinev fraktsioon ning puistetihedus, mistõttu oli otstarbekas kasutada erinevate materjalide omavahelist suhet protsentides mahuliselt. Partii arvutamiseks:

- 1) määrati soovitud kuivsegu maht liitrites (edaspidi V_{kuiv});
- 2) valiti partii tsementi (edaspidi T_s). Tsemendi kogusel lähtuti mahulisest suhtest 3:1. Seega kõikide kuivsegu kogumaht koosnes 25 % tsemendist ning 75% segaliivast. $T_s = 0,25 V_{kuiv}$;
- 3) valiti partii kvartsiiva ja klaasliiva vaheline suhe väljendatuna protsentides nii, et nende summa moodustaks 100%: $L_i + K_l = 100$ %. Partii liivade segu nimetati segaliivaks (edaspidi SL);
- 4) valiti partii kvartsiiva fraktsioone 0,0...0,5 mm (edaspidi *peenliiv*, PL) ja 0,5...1,2 mm (edaspidi *keskliiv*, KL), millede summeerides saadi kvartsiiva kogus: $PL + KL = L_i$;
- 5) valiti partii fraktsioone 0,5...1,0 mm (edaspidi *peenklaas*, PK); 1,0...2,0 mm (edaspidi *keskklaas*, KK) ja 2,0...4,0 mm (edaspidi *jämeklaas*, JK) ning saadi summeerides kokku klaasliiva (edaspidi K_l) kogus; $PK + KK + JK = K_l$.
- 6) arvutati materjalide massid vastavalt valemitele:

$$m_{PL} = V_{kuiv} * \frac{SL}{100} * \frac{PL}{100} * \rho_{0,PL}/1000 \quad (3.1)$$

$$m_{KL} = V_{kuiv} * \frac{SL}{100} * \frac{PK}{100} * \rho_{0,KL}/1000 \quad (3.2)$$

$$m_{PK} = V_{kuiv} * \frac{SL}{100} * \frac{PK}{100} * \rho_{0,PK}/1000 \quad (3.3)$$

$$m_{KK} = V_{kuiv} * \frac{SL}{100} * \frac{KK}{100} * \rho_{0,KK}/1000 \quad (3.4)$$

$$m_{JK} = V_{kuiv} * \frac{SL}{100} * \frac{JK}{100} * \rho_{0,JK}/1000 \quad (3.5)$$

$$m_{Ts} = V_{kuiv} * \frac{Ts}{100} * \rho_{0,Ts} / 1000 \quad (3.6)$$

kus, lisaks eelmises punktis toodud tähitele:

- m_{PL} - partii peenliiva mass [kg];
- m_{KL} - partii keskliiva mass [kg];
- m_{PK} - partii peenklaasliiva mass [kg];
- m_{KK} - partii keskklaasliiva mass [kg];
- m_{JK} - partii jämeklaasliiva mass [kg];
- m_{Ts} - partii tsemendi mass [kg];
- $\rho_{0,PL}$ - peenliiva puistetihedus [kg/m³];
- $\rho_{0,KL}$ - keskliiva puistetihedus [kg/m³];
- $\rho_{0,PK}$ - peenklaasliiva puistetihedus [kg/m³];
- $\rho_{0,KK}$ - keskklaasliiva puistetihedus [kg/m³];
- $\rho_{0,JK}$ - jämeklaasliiva puistetihedus [kg/m³];

7) arvutati kuivsegu partii mass:

$$M_{kuiv} = \sum m_{SL} + m_{Ts} \text{ [kg]} \quad (3.7)$$

8) teostati kontrollarvutus:

$$M_{kuiv,KT} = \sum m_{PL} + m_{KL} + m_{PK} + m_{KK} + m_{JK} + m_{Ts} \text{ [kg]} \quad (3.8)$$

$$M_{kuiv,KT} = M_{kuiv} \quad (3.9)$$

9) koostati tabel

Tabel 3.1 Arvutustabel partii materjalide koguste saamiseks

	Katse nr:	8	Segu kood:	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK			
läheb segusse	Kuivsegu mah:	V=	1,5	L	Segu mass	M =	1,673 kg
tuleb täita							
Kvartsliiv Li:	Peenliiv	PL=	40,6	%	Peenliiv	m _{PL} =	0,676 kg
	Keskliiv	KL=	3,1	%	Jämeliiv	m _{KL} =	0,050 kg
Klaasliiv Kl:	Peenklaas	PK=	9,4	%	Peenklaas	m _{PK} =	0,029 kg
	Keskklaas	KK=	9,4	%	Keskklaas:	m _{KK} =	0,024 kg
	Jämeklaas	JK=	37,5	%	Jämeklaas	m _{JK} =	0,084 kg
Li + Kl = 100%	Kvartsliiv	Li =	43,7	%	Kvartsliiv	m _{Li} =	0,726 kg
100%	Klaasliiv	Kl =	56,3	%	Klaasliiv	m _{KL} =	0,137 kg
SL + Ts = 100%	Segaliiv	SL =	75,0	%	Segaliiv	m _{SL} =	0,863 kg
100%	Tsement	Ts =	25,0	%	Tsement	m _{Ts} =	0,540 kg
Vesitsementtegur		VT =	0,5	-	Vesi	m _{Ve} =	0,270 kg
Puistetihedused:							
Peenliiva puistetihedus ρ ₀ =		1480	kg/m ³	Peenklaasi puistetihedus ρ ₀ =		270	kg/m ³
Keskliiva puistetihedus ρ ₀ =		1440	kg/m ³	Keskklaasi puistetihedus ρ ₀ =		230	kg/m ³
Tsemendi puistetihedus ρ ₀ =		1440	kg/m ³	Jämeklaasi puistetihedus ρ ₀ =		200	kg/m ³

3.3.3 Segude tähistamine

Segude tähistamisel lähtuti numbritest 1-17. Igale numbrile vastas segukood, mis tulenes segu täitematerjalide protsentuaalsest koostisest: xxPL-xxKL-xPK-xxKK-xxJK, kus xx tähistab antud peentäitematerjali protsenti kogu segaliivast.

Näiteks segu, mille täitematerjal osa koosnes 40,6 % peenliivast, 3,1 % keskliivast, 9,4 % peenklaasist, 9,4% keskklaasist, 37,5 % jämeklaasist kodeeriti 40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK.

3.3.4 Kuivsegude valmistamine

Enne katsetega alustamist tehti valmis kuivsegud. Kuivsegude valmistamiseks kaaluti kõik vastava numbriga segusse vaja minevad koostisosad. Kaalutud koostisosad paigutati segatavasse anumasse järjekorras: jämeklaasliiv, kesk-klaasliiv, peenklaasliiv, keskliiv, peenliiv, tsement. Järjekord on üles ehitatud vastavalt: jämedamad terad allpool ning peenemad terad ülal. Segamine toimus 5 minutit, mitte 10 minutit nagu M. Pogga magistritöös [1]. Põhjuseks klaasliiva sisaldus kuivsegudes, mida võivad segisti labad kahjustada/purustada.

Suuremate koguste kuivsegude valmistamisel kasutati kaalumiseks KERN CB 12 K 2 kaalu, mille kaalumistäpsus on 2 g ja maksimaalne kaalutav raskus 12 kg, ning KERN EMS kaalu, mille kaalumistäpsus on 0,1 g ja maksimaalne kaalutav raskus 6 kg. Segamiseks kasutati Soroto 40L-30 segumasinat mahutavusega 40 liitrit.

Väiksemate koguste kuivsegude valmistamisel kasutati samuti KERN EMS kaalu, kaalumistäpsusega 0,1 g ning maksimaalse kaalutava raskusega 6 kg. Segamiseks kasutati segistit „Hobart“ vastavalt.

Printimisbetooni kuivsegude valmistamiseks kasutati KERN FKB 65K1A kaalutäpsusega 1 g ning maksimaalne kaalutav raskus kuni 65 kg. Segamiseks kasutati Collomatic TMS 2000 segumasinat mahutavusega 100 liitrit.

3.3.5 Peentäitematerjali terastikulise koostise määramine sõelumismeetodiga

Peentäitematerjali terastikulise koostise määramisel sõelumismeetodiga lähtuti standardist EVS-EN 933-1:2012 „Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod“ [38]. Katses esinevad erinevused võrreldes standardiga [38]:

- autoril oli kasutusel juba eelnevalt kuivatatud liiv, mistõttu puudus vajadus liiva kuivatusahjus eraldi kuivatada;
- kasutatud liiva ei pestud eraldi läbi enne sõelumist;
- sõeltekomplektist puudus 0,063 mm avadega sõel.

Kasutatud katseseadmed:

- kaal KERN KB 2000-2N, mille kaalumistäpsus on 0,01 g ning mõõtepiirkond 2010 g;
- sõelte komplekt, mis koosnes standarditele EVS-EN 933-2:2020 „Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 2: Terastikulise koostise määramine. Katsesõelad, avade nimimõõtmed“ [39] ning EVS-ISO 3310-1:2017 „Sõelad. Tehnilised nõuded ja katsetamine. Osa 1: Metallist traatvõrksõelad“ perforeeritud metallplaatsõeltest. Avade nimiläbimõõdud olid 4,0 mm; 2,0 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,125 mm. Selles järjekorras

alates ülevalt alla olid sõelad üksteise peale kinnitatud. Ülemisel, 4 mm nimiläbimõõdu avadega, sõela peale kinnitati ka kaas, alumise sõela alla kinnitati põhi;

- sõelumismasin Retch AS 200 Digit;
- anum üksikproovi kaalumiseks;
- pehme ning jäik pintsel sõelte puhastamiseks;
- lai anum sõeltelt tuleva materjali kaalumiseks.

Katse käik:

- 1) kvartsiiva üksikproove kaaluti 200 g ning klaasliiva üksikproovi massiks valiti 50 g, vältides seejuures sõelte ülekoormamist;
- 2) pesemata ning kuiv üksikproov kallati sõeltekomplekti;
- 3) käivitati sõelumismasin 5 minutiks ning sõeluti sobiva sagedusega;
- 4) eraldati järjest ükshaaval sõelad, alustades pealmisest, suurimate avadega, sõelast;
- 5) sõelte jäänud materjal raputati käsitsi anumasse. Täiendavaks sõelte puhastamiseks kasutati pintslaid;
- 6) kaaluti igale sõelale ja põhjale jäänud materjali jääk R_i [3]. Seejuures kontrolliti ka ülekoormatust valemiga:

$$\frac{Ax\sqrt{d}}{200} \quad (3.10)$$

kus A- sõela pindala [mm²];

d- sõela ava nimiläbimõõt [mm].

- 7) Kontrolliti, et üksikproovide jääkide R_i masside summa oleks võrdne esialgselt sõeltele valatud massiga M . Lubatud erinevus koondproovi massiga on 1%. Kontrolli negatiivse tulemusel tuleb katset korrata;
- 8) arvutati täitematerjali osajääk sõelal a_i või põhjal i valemiga

$$a_i = \frac{R_i}{M_i} \times 100 \quad (3.11)$$

kus: a_i - täitematerjali osjääk sõelal [%];

R_i - üksikproovi mass sõelal [g];

M_i - kogu proovi mass [g];

i - sõela ava nimiläbimõõt {4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,125; <0,125}.

9) Arvutati kogujääk A_i sõelal i valemiga

$$A_i = a_{4,0} + \dots + a_i \quad (3.12)$$

kus: a_i - liiva osajääk sõelal i [%]

i - sõela ava nimiläbimõõt {4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,125; <0,125}

10) Arvutati läbind L_i %-des sõelal i :

$$L_i = a_{4,0} + \dots + a_i \quad (3.13)$$

kus: A_i - liiva kogujääk sõelal i [%];

i - sõela ava nimiläbimõõt {4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,125; <0,125}.

11) Koostati tulemust põhjal sõelkõver liivale. Sõelkõver näitab graafiliselt sõelte läbindate [%] sõltuvust sõela nimiläbimõõdust [mm].

3.3.6 Mõrdi valmistamine segistiga „Hobart“

Mõrdi valmistamine toimus lähtudes standarditest EVS-EN 196-1:2016 „Tsemendi katsetamine. Osa 1: Tugevuse määramine“ [40], EVS-EN 1015-2:2004+A1:2007 „Müürimörtide katsemeetodid. Osa 2: Mõrdiproovide võtmine ja katsemörtide valmistamine“ [41]. Antud magistritöös lisandeid mõrdile ei lisatud. Enne mõrdi valmistamist konditsioneeriti lähtematerjalid temperatuuril 20 ± 2 °C. Vesi seisis

toatemperatuuril vähemalt 24 h enne katsete läbiviimist, et kraanist tulenev õhk jõuaks veest väljuda.

Kuivsegu oli eelnevalt valmistatud peatüki 3.3.4 kohaselt ning mördi valmistamiseks kasutatav vesi vastas standardile EVS-EN 1008 [12].

Vastavalt standardile EVS-EN 1015-2 [41] valmistati standardile EVS-EN 196-1 [40] kohase segistiga värsket betooni mahuga vahemikus 0,5- 2,5 dm³.

Katseseadmed:

- kaal KERN KB 2000-2N, mille kaalumistäpsus on 0,01 g ning mõõtepiirkond 2010 g. Nõutud täpsus oli seejuures 1g;
- Stopper mõõtetäpsusega 1 s, mis vastav EVS-EN 196-1 [40] nõuetele;
- Segisti „Hobart“, mis vastas EVS-EN 196-1 [40] nõuetele;
- niiske lapp;
- lusikas.

Katse käik:

- 1) kaaluti ära vastavalt punktis 3.3.2 punktis saadud tulemusel kuivsegu;
- 2) kaaluti ära vajalik vee kogus;
- 3) niisutati segisti laba ning kauss niiske lapiga;
- 4) lisati kaussi vesi ning käivitati „Hobart“;
- 5) käivitati stopper ning lisati 10 sekundi jooksul ühtlasel kiirusel kuivsegu;
- 6) segati kuivsegu 30 sekundit madalatel pööretel;
- 7) peatati segisti 1 minutiks, mille vältel eemalda segisti labalt segu kaussi, segati lusikaga trumli põhjas olev segu üles ning äärtel olev segu trumli keskele;
- 8) käivitati uuesti segisti 30 sekundiks madalatel pööretel;
- 9) peatati segisti 5 minutiks, et klaasliiva veeimavuse mõju näha;
- 10) käivitati „Hobart“ madalatel pööretel 30 sekundiks;

11) peatati segisti.

3.3.7 Mördi veevadjaduse määramine

Mördi veevadjaduse määramisel lähtuti standardist EVS-EN 1015-3:2004+A2:2007 „Müürimörtide katsemeetodid. Osa 3: Mördisegu konsistentsi määramine (raputuslaual)” [42]. Enne mördisegu töödeldavuse määramist raputuslaua meetodiga peab vastavalt standardile olema partii maht vähemalt 1,5 liitrit.

Kasutatud katseseadmed:

- raputuslaud, mis vastas standardile EVS-EN 196-1 [40]. Erinevus võrreldes eelmainitud standardiga seisnes pealmises kettaplaadis, mis ei olnud valmistatud mineraalsest klaasist, vaid orgaanilisest klaasist;
- tihendustamp vastavalt standardis EVS-EN 1015-3 [42] kirjeldatule;
- roostevaba tüvikoonusekujuline vorm vastavalt standardis EVS-EN 1015-3 [42] kirjeldatule;
- pahtellabidas;
- lusikas;
- niiske lapp;
- stopper mõõtetäpsusega 1 sekund;
- nihik täpsusega $d = 0,1$ mm.

Katse käik:

- 1) segati valmis vastavalt 3.3.6 kirjeldatule värske mört ning jäeti ootele. Stopper töötas alates mördi valmistamise alguses;
- 2) kui raputuslauda ei olnud 24 tunni jooksul kasutati, tehti sellega 10 lööki;
- 3) niisutati niiske lapiga vormi koonuse sisepind ning raputuslaua ketas;
- 4) vorm asetati raputuslaua tsentrisse;

- 5) ühe käega avaldati koonusele survet, et see raputuslaual ei nihkuks. Samal ajal teise käega tõsteti lusikaga umbes poole koonuse ulatuses tardumata mörti. Tihendati tambiga lüües 10 x, tagamaks vormi ühtlane täituvus. Lisati veel lusikaga mörti, nii et vormi peal oleks kuhi. Tihendati 10 tihendustambi löögiga poole vormi ulatuses;
- 6) eemaldati koonuse kael ning üleliigne kuhi vormil eemaldati pahtellabida abil;
- 7) alates mördi valmimisest kuni vormi tõstmiseni oodati 2 minuti täitumist;
- 8) tõsteti 10 sekundi jooksul vorm aeglaselt ja ühtlases tempos vertikaalselt üles ning lasti mördil laiali valguda;
- 9) tehti 10 lööki raputuslauaga. Kiirusega 1 löök sekundis;
- 10) fikseeriti nihikuga laialivalgunud mördi kaks teineteisega ristuvat diameetri mõõdet d_1 ja d_2 ning arvutati nende aritmeetiline keskmine. Kui tulemus jäi vahemikku 150 5 mm, siis fikseeriti kasutatud vee kogus. Negatiivse tulemuse korral muudeti vee kogust ning korrati katset algusest peale.

3.3.8 Mördi konsistentsi kadu

Mördi konsistentsi kao määramine toimus taoliselt 3.3.8 punktis välja toodule. Intervall, mille tagant segu konsistentsi määrati ning diameetrid ristisuunas fikseeriti, oli iga 10 minuti tagant.

3.3.9 Katsekehade valmistamine

Katseprismad

Katseprismade valmistamisel lähtuti standardist EVS-EN 1015-11:2019 „Müürimörtide katsemeetodid. Osa 11: Kivistunud mördi painde- ja survetugevuse määramine“ [43], kus on katseprismade mõõtmetena välja toodud 160 x 40 x 40 mm.

Katse käik:

- 1) värske mört valmistati punkti 3.3.6 kohaselt punktis 3.3.7 määratud vesitsementteguriga;

- 2) enne mördi vormi asetamist õlitati need, et kivistunud mört saada hiljem ilma katsekeha kahjustamata vormist kätte;
- 3) vastavalt standardile täideti vorm kahes kihis ning tihendati mõlemat kihti 25 korda tambitsa löögiga. Kusjuures peale teist korda täitmist tihendati 1/2 kõrgusele vormist;
- 4) peale tihendamist eemaldati üleliigne mört pahtlilabida abil nii, et mördi pind vormis oleks võimalikult sile ning vormi servadega tasa;
- 5) vorm asetati kile alla 2 ööpäevaks, kus tema RH 95 +/- 5%;
- 6) peale 2 ööpäeva möödumist vabastati katsekehad vormist ning asetati viieks päevaks vette;
- 7) 7-päevased katsekehad läksid edasi katsetamisele, 21-päevased katsekehad viidi peale 7 päeva möödumist 14 päevaks hoiuruumi, kus temperatuur püsis 20 °C +/- 2°C ning suhteline õhuniiskus oli 65 +/- 5 %;

3.3.10 Mördi tiheduse määramine

Mördi tiheduse määramiseks kaaluti 3.3.9 katsekehade valmistamise käigus tühja vormi mass ning vahetult enne kile alla panemist ka täis vormi mass. Arvutati mördi tihedus valemiga

$$\rho = \frac{\sum(m_{2;i} - m_{1;i})}{V} \times 10^3 \quad (3.14)$$

kus: ρ - mördi tihedus [kg/m³];

$m_{1;i}$ - tühja vormi mass [g];

$M_{2;i}$ - täis vormi mass [g];

V- vormi täitva mördi ruumala [cm³].

Saadud tulemus ümardati kümnelisteni.

3.3.11 Veega küllastunud katsekehade ruumala

Seitsme päevased katsekehad, mis olid eelvalt 5 päeva vees seisnud kaaluti hüdrostaatilise kaalumise meetodil vastavalt standardile EVS-EN 12390-7:2019 „Kivistunud betooni katsetamine. Osa 7: Kivistunud betooni tihedus“. [43]. Erinevus standardiga- massid registreeriti grammides ning ruumala saadi g/cm^3 .

Hüdrostaatiliseks kaalumiseks kasutatud katseseadmed:

- kaal KERN EMS täpsusega 0,1 g ning mis oli varustatud riputiga;
- veega täidetud ämber.

Katse käik:

1. eelnevalt 5 päeva vees kivistunud katsekehad asetati riputi külge ning fikseeriti katsekeha mass vees;
2. katsekeha võeti veest ning eemaldati liigne vesi niiske lapiga;
3. kaaluti katsekeha õhus;
4. arvutati katsekeha ruumala valemiga

$$V_{m\ddot{a}rg} = \frac{m_{\ddot{o}hus} - m_{vees}}{\rho_w} \quad (3.15)$$

kus: $V_{m\ddot{a}rg}$ - katsekeha ruumala [g/cm^3];

$m_{\ddot{o}hus}$ – katsekeha mass õhus [g];

m_{vees} – uputatud katsekeha näiv mass [g];

ρ_w – vee tihedus temperatuuril 20 °C ($998 \text{ kg/m}^3 = 0,998 \text{ g/cm}^3$).

3.3.12 Kivistunud katsekehade märgtihedus

7 päevastel katsekehadel määrati märgtihedus. Veega immutatud kivistunud katsekehade ruumala leiti vastavalt punktis 3.3.11 toodule ning saadi märgtihedus vastavalt valemile

$$\rho_{m\ddot{a}rg} = \frac{m_{\ddot{o}hus}}{V_{m\ddot{a}rg}} \quad (3.16)$$

kus: $\rho_{m\ddot{a}rg}$ - katsekeha m\ddot{a}rgtihedus [kg/m³];

$V_{m\ddot{a}rg}$ - katsekeha ruumala, mis on saadud veega k\ddot{u}llastunud olekus [kg/m³];

$m_{\ddot{o}hus}$ - \ddot{o}hus kaalutud katsekeha mass [g].

Saadud tulemus \dd{u}mardati k\dd{u}mnelisteni.

3.3.13 Kivistunud prismade ruumala

Kivistunud katsekehade ruumalade saamiseks peeti silmas standardit EVS EN 12390-1 „Kivistunud betooni katsetamine. Osa 1: Kuju, m\ddot{o}\ddot{o}tmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad n\ddot{o}uded” [44]. Katsekehad m\ddot{o}\ddot{o}deti nihikuga t\dd{a}psusega 0,1 mm. V\dd{o}eti 3 pikkuse ja laiuse m\ddot{o}\ddot{o}det m\dd{o}lemalt otsatahult ning m\dd{o}lemalt poolt prisma k\dd{o}rguse m\ddot{o}\ddot{o}tmed 3 eri kohast. Leiti nende aritmeetilised keskmised ning arvutati ruumala valemiga

$$V_{21p} = a_{kesk} * b_{kesk} * h_{kesk} / 1000 \quad (3.17)$$

kus: V_{21p} – Kivistunud prisma ruumala [cm³];

a_{kesk} – keskmine laiuse m\ddot{o}\ddot{o}de [mm];

b_{kesk} – keskmine pikkuse m\ddot{o}\ddot{o}de [mm];

h_{kesk} – keskmine k\dd{o}rguse m\ddot{o}\ddot{o}de [mm].

3.3.14 Kivistunud katsekehade tiheduse m\dd{a}aramine

Kivistunud katsekehade tihedus ning surve-ja paindetugevus m\dd{a}arati 21- p\dd{a}evastel katsekehadel, kuna esimesel korral betooni printimine tehnilistel p\dd{o}hjustel eba\dd{o}nnestus ning j\dd{a}rgmise printimise aja kokkuleppimisel selgus, et hiljem printides tuleb juurde ka

ajaline probleem. Mistõttu otsustati käsitsi valmistatud katsekehad välja võtta 21-päeva vanuselt, et printimisbetoonist katsekehadega (21 päeva vanused) võrrelda.

21- päevastel katsekehadel leiti tihedus 21 päeva vanuselt valemiga

$$\rho_{21p} = \frac{m_{\text{õhus}}}{V_{21p}} \quad (3.18)$$

kus: ρ_{21p} - 21 päeva vanuse katsekeha tihedus [kg/m³];

V_{21p} - 21 päevase katsekeha ruumala [kg/m³];

$m_{\text{õhus}}$ - õhus kaalutud katsekeha mass 21 päeva vanuselt [g].

Saadud tulemus ümardati kümnelisteni.

3.3.15 Prisma surve- ja paindetugevuse määramine

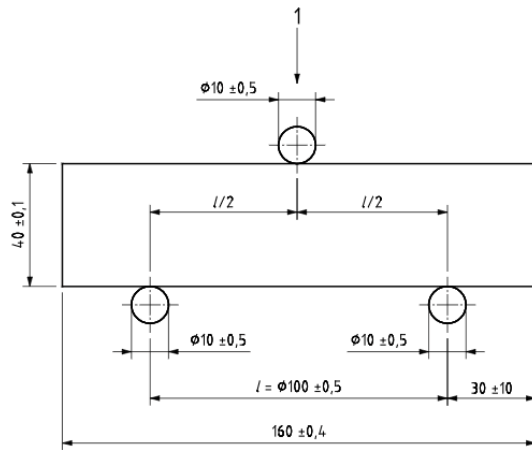
Katsekehade survetugevused määrati peale paindetugevust vastavalt standardile EVS-EN 1015-11:2019 „Müürimörtide katsemeetodid. Osa 11: Kivistunud mördi painde- ja survetugevuse määramine“ [45]. 7-päevastel katsekehadel paindetugevust ei määratud.

Katseseade:

- hüdrauliline press Strassentest FHF. Paindekatse koormuse mõõtetäpsus 0,05 kN, survekatse koormuse mõõtetäpsus 1 kN.

Katse käik:

- 1) Asetati prisma paindekatseks katseseadmesse joonise 2.1 järgi. Seejuures vormipind paiknes autori poolel.



Joonis 3.1 Paindetugevuse määramise katse koormamiskeem [45]

- 2) Rakendati koormus vertikaalselt silde keskele koormusrulli kaudu. Koormust suurendati sujuvalt kiirusega 50 ± 10 N/s kuni prisma murdumiseni ning fikseeriti purustav koormus F_f [kN];
- 3) Arvutati katsekeha paindetugevus valemiga

$$R_f = 1,5 \times \frac{F_f \cdot x \cdot l}{b \cdot x \cdot h^2} \quad (3.19)$$

kus: R_f - ühe katsekeha paindetugevus [MPa]

F_f - katsekeha purustav koormus [kN];

h - prisma ristlõike kõrgus [mm];

b - katsekeha ristlõike laius [mm];

l - tugede vaheline kaugus [mm].

Arvutati kolme katsekeha paindetugevuse aritmeetiline keskmine.

- 4) Kaheks kehaks murdunud katsekehadega viidi läbi survetugevuskatse. Selleks asetati need üksteise järel tsentriliselt surveplaatide vahele nii, et vormipind jäi autori poole;
- 5) Alustati katsekehade koormamist käsitsi juhtimisega sujuvalt kiirusega 2400 ± 200 N/s kuni katsekeha purunemiseni. Purustav koormus registreeriti [kN]

6) Arvutati üksikproovikehade survetugevused valemiga

$$R_{c,i} = \frac{F_{c,i}}{b \times h} \times 10^3 \quad (3.20)$$

kus: $R_{c,i}$ - katsekeha üksikproovi survetugevus [MPa];

$F_{c,i}$ - Katsekeha purustanud koormus [kN];

b - katsekeha ristlõike laius [mm];

h - katsekeha ristlõike kõrgus [mm].

7) Arvutati kõikide üksikproovide survetugevused välja ning leiti nende aritmeetiline keskmine $R_{c, kesk}$ ühe mördi kohta.

Kui survekatses üks tulemus erines kuue keskmistest tulemustest $\pm 10\%$, siis see tulemus kõrvaldati ning keskmise arvutamiseks loeti viie katse tulemused.

3.3.16 Printimise osa

Printimiseks valiti välja neli segu, milledeks oli nr 1, nr 9, nr 13 ja nr 17.

- segu nr 1, koodiga 50PL-50KL-0PK-0KK-0JK valiti etalonseguks, kuna sellest puudub klaasliiv;
- segu nr 9 koodiga 33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK tegi huvitavaks tema madal vesitsementtegur ning jämeklaasi suurim sisaldus;
- segu nr 13 koodiga 0PL-50KL-50PK-0KK-0JK sai valitud tema peenklaasi suurima sisalduse tõttu ja suurima vesitsementteguri tõttu;
- Segu nr 17 koodiga 50PL-0KL-0PK-50KK-0JK valiti tema suurima keskklaasliiva sisalduse tõttu.

Printeri pumba tehnilise rikke tõttu jõuti printida segu nr 9 ning segistis segati veega nr 13 ja nr 17. Kuivsegule 50PL-50KL-0PK-0KK-0JK vett ei lisatud ega printimist proovida ei olnud võimalik.

Printimiseks kasutati:

- Kaal;
- ämbrid;
- betoonisegisti mahutavusega 80L;
- betoonipump;
- kuutelejeline robotkäsi IRB 6640 M2004;
- sülearvuti robotkäe ja printimispea teekonna programmeerimiseks;
- sildkraana;
- veepihusti;
- eelnevalt valmistatud kuivsegud.

Katse käik:

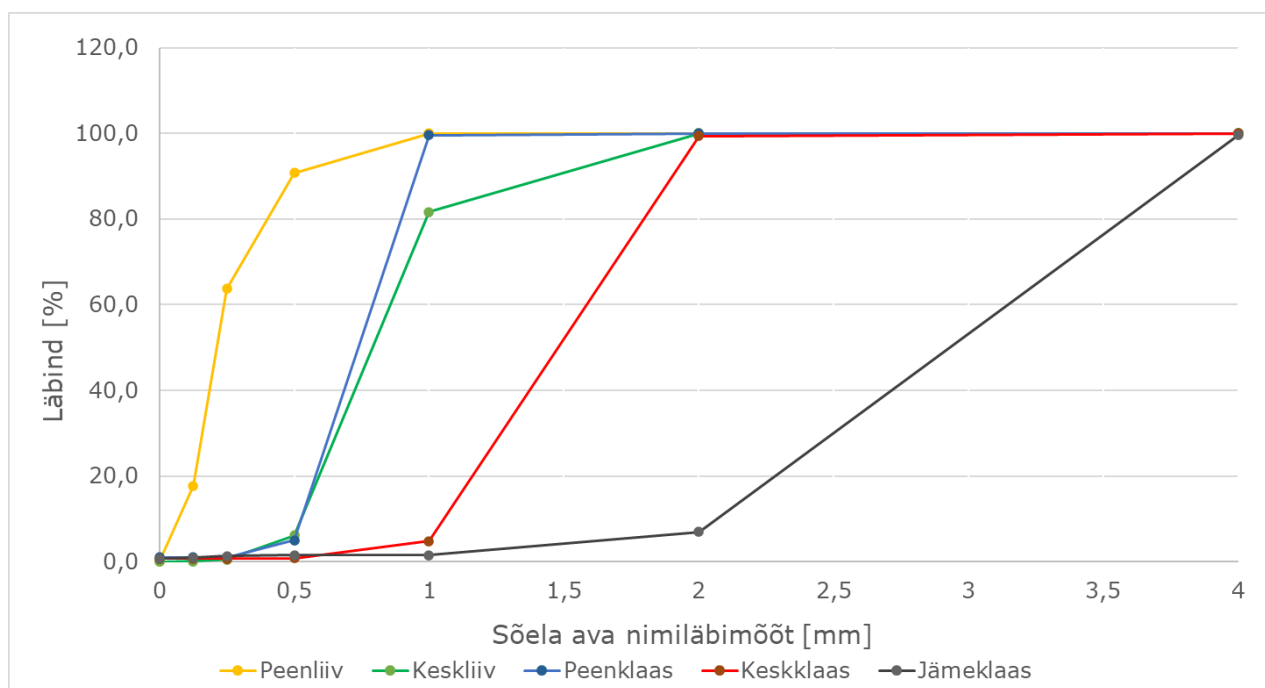
- 1) kaaluti eelnevalt välja valitud ja valmistatud kuivsegude jaoks vajalik kogus vett ja seadistati robotkäe ja printimispea teekond;
- 2) segistisse kallatakse kuivsegu, millele lisatakse vett;
- 3) segu segati kuniks kuivsegu ja vesi olid segunenud;
- 4) segumasinast lasti segu betoonipumpa;
- 5) betoonipump ja printer käivitati ning kuniks segu lõppemiseni prinditi betooni.

4. KATSEANDMETE ANALÜÜS

4.1 Peentäitematerjal

4.1.1 Kvartsliid- ja paisutatud klaasliiva sõelkõverate võrdlus

Katses kasutati peenet kvartsliidu fraktsiooniga 0...0,5 mm; kesk-kvartsliidu fraktsiooniga 0,5...1,2 mm; peenklaasi fraktsiooniga 0,5...1,0 mm; keskklaasi fraktsiooniga 1,0...2,0 mm ning jämedat klaasliiva fraktsiooniga 2,0...4,0 mm. Sõelkatsete andmetega (vaata lisa 2) koostati sõelkõverad, mis paigutati ühele graafikule (joonis 4.1).



Joonis 4.1 Liivade sõelkõverate võrdlus

Tulemustest nähtub, et kõikide liivade puhul on tootjapoolne etteantud fraktsioon tõene.

Peenusmooduli puudumisel on võimalik liiva peenust hinnata nimiläbimõõduga 0,50 mm sõela läbimisel, vastavalt tabelis 1.3 toodule.

Peene kvartsi liiva koostises oli tegelikult ~9 % massist suuremaid terasid kui diameetriga 0,5 mm. Kõige suurema osa koostisest moodustas 0,125...0,5 mm läbimõõduga fraktsioon (~46 %), sellele järgnes osakaaluga ~27 % fraktsioon 0,25...0,5 mm. Terasid diameetriga 0,0...0,125 mm leidis peenliivas ~18 %. Võrreldes M. Pogga magistritöös [1] saadud tulemustega, on peenliiva fraktsioonid võrdväärased, kõikides kuni 4 %. 0,500 mm sõela läbindiks massiprotsentides saadi ~91 %. Seega liigitub vastavalt tabelile 1.3 liiv peeneteraliseks peentäitematerjaliks.

Keskliiva fraktsioon, mis tootja poolt on määratud fraktsiooniga 0,5...1,2 mm, sisaldas endas kõige enam, vastavalt ootusele, 0,5...1,0 mm fraktsiooni (~76 %). Väiksemat fraktsiooni kui 0,5 mm sisaldas keskliiv ~6 %. Sõelumiskatse tulemusena saadi, et fraktsiooni 1,0...2,0 mm sisaldus keskliivas oli ~18 %. Võrreldes M. Pogga magistritööga [1] seisnes erinevus peenema, kui 0,5 mm, suurem sisaldus fraktsiooni 0,5...1,0 mm asemel (~5 %). 0,500 mm nimiläbimõõduga sõela läbindiks massiprotsentides saadi ~6 %, millest saame järeldada, et tegu on jämedateralise peentäitematerjaliga.

Tootja poolt deklareeritud 0,5...1,0 mm fraktsiooniga klaasliiva terastikuliseks koostisena sõelumiskatsel saadi, et see sisaldas tegelikult 0,5...1,0 mm fraktsiooni 94,5 %. Suuremaid läbimõõduga terasid kui 1,0 mm leidis ~0,5 %. Väiksemaid terasid kui 0,5 mm leidis ~5 %. M. Pogga lõputööga [1] võrreldes on tulemused võrdväärased.

Antud tööd keskklaasliivaks nimetatud ehk 1,0...2,0 mm fraktsiooniga klaasliiv sisaldas vastavalt sõelumiskatsele endas vastavalt ootustele 1,0...2,0 mm fraktsiooni (~94,5 %). Sõela 1,0 mm läbis ~5 % massist ning suuremaid terasid, kui 2,0 mm saadi ~0,5 %. M. Pogga lõputööga [1] võrreldes on tulemused sarnased, tema on enda töös antud fraktsiooniga liiva nimetanud jämeklaasiks.

Jämeklaasi ehk tootja poolt määratud 2,0...4,0 mm fraktsiooniga klaasliiv sisaldas endas ~93 % 2,0...4,0 mm fraktsiooni. Nimiläbimõõduga 4 mm sõelale jäi üksikproovi massist ~0,5 %. Fraktsiooni 1,0...2,0 mm leidis vastavalt katse tulemustele ~5,5 %. Ülejäänud (~1 %) moodustas väiksem kui 1 mm fraktsioon.

Kuigi peenklaasina nimetatud klaasliiv jääb tabelis 1.3 toodud läbindi liigituse piiri peale (0,50 mm nimiläbimõõduga sõela ava läbind massiprotsentides 5%), siis võib ka peenklaasliiva kohta öelda, et tegu on suhteliselt jämedateralise peentäitematerjaliga. Keskklaasliiv ning jämeklaasliiv jäävad tabeli 1.3 piiridest täielikult välja.

Mõningane kõikumine piiridest välja on ootuspärane ning lubatud.

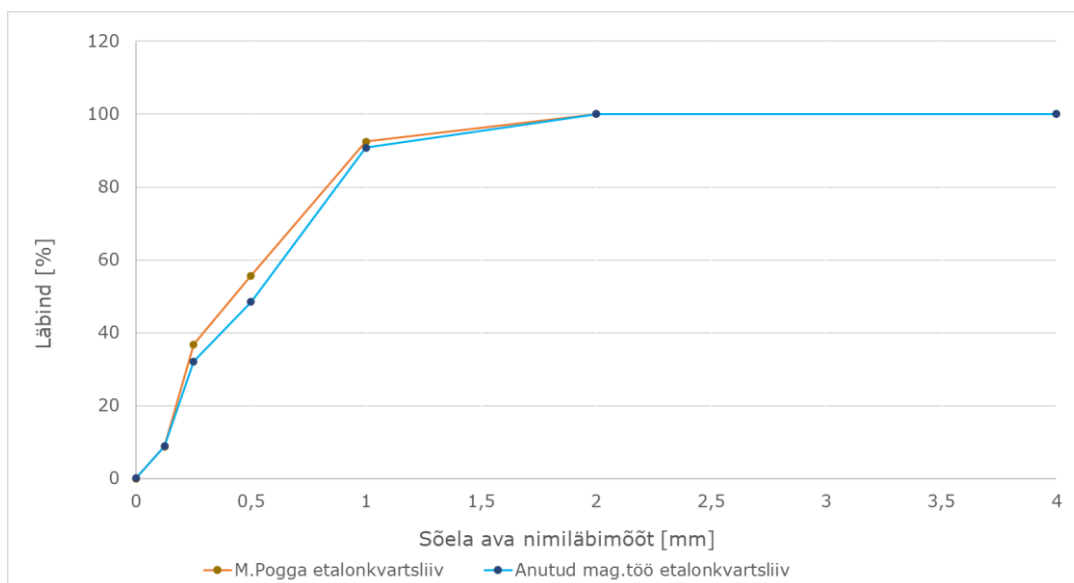
4.2 Kvartsliaa asendamise mõju klaasliiva vastu

4.2.1 Etalonsegu koostise valik ning omadus

Antud magistritöö etalonseguks valiti segu, mis koosnes 25% tsemendist ning 75% peentäitematerjalist. Täitematerjali suhe koosnes 50:50 peen-ja keskliivast. Valikul lähtuti M. Pogga lõputöö [1] etalonsegust, kuid tema valis peenliiv:keskliiv suheteks 60:40. Etalonkvartsliaa läbindate võrdlus M. Pogga lõputööga on toodud tabelis 4.1. Etalonsegu täitematerjali sõelkõver arvutati peatükis 3.3.5 toodud arvutusmeetodiga ning hinnati erinevust vaatluse alusel (joonis 4.2). Sõelkõveralt nähtub, et antud magistritöö etalonsegu täitematerjal on mõnevõrra jämedama fraktsiooniga, mis peabki olema.

Tabel 4.1 Ainult kvartsiivadega segude läbindite võrdlus

Sõela ava [mm]	Läbind [%]	
	M.Pogga etalonkvartsliaa	Anatud mag.töö etalonkvartsliaa
4	100	100
2	100	100
1	92,5	90,8
0,5	55,7	48,5
0,25	36,8	32,1
0,125	8,8	8,9
>0,125	0	0,2



Joonis 4.2 Etalonsegu liiva sõelkõvera võrdlus M.Pogga magistritöö [1] etalonkvartsliaavaseguga

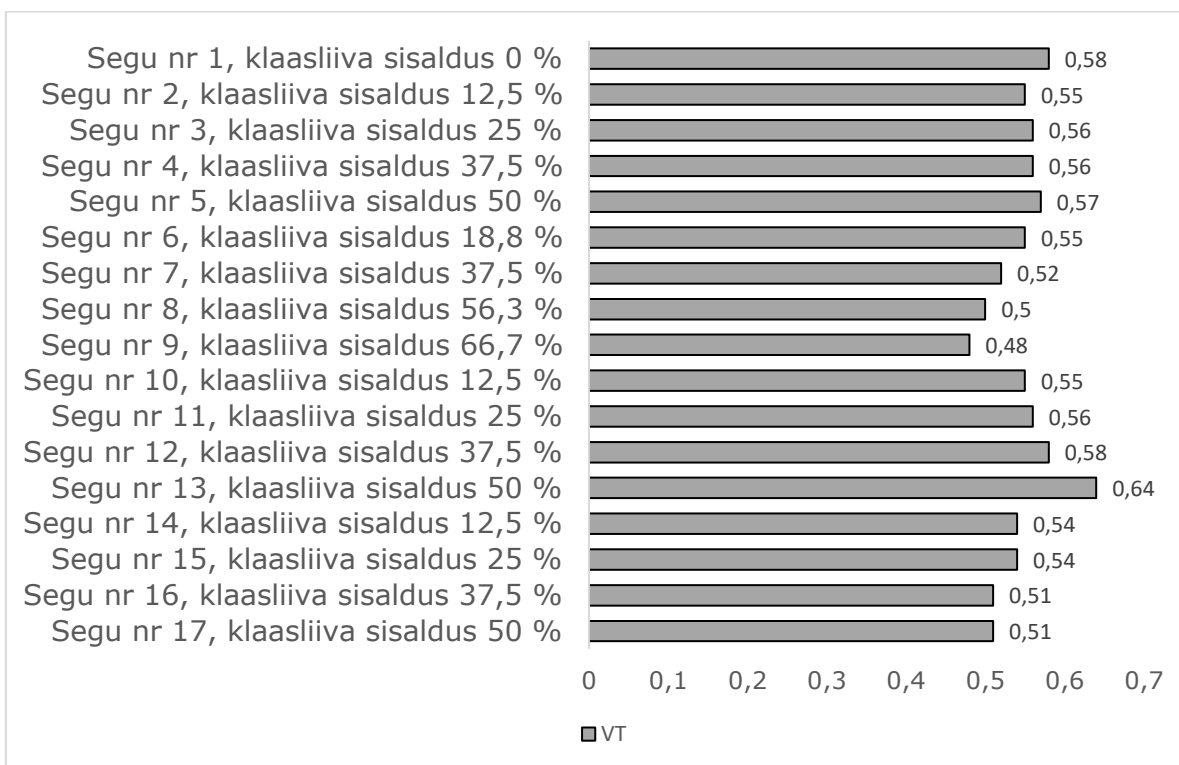
Peale peen- ja keskliiva suhete erinevuseks antud magistritöö ja M. Pogga magistritöö [1] vahel tsemendis. Antud magistritöös on kasutatud CEM II 42,5R A-M/(T-L) tsemendi ja Poggal CEM I 52,5 R.

4.2.2 Veevajadus

Printimisbetooni segu veevajadus määrati töödeldavuse 150 ± 5 mm ning seda iseloomustatakse vesitsementteguriga (VT). Tabelis 4.2 on toodud vesitsementteguri määramise tulemused, kus on välja toodud ka iga segu fraktsioonide protsent segaliivast. Joonisel 4.3 on toodud vesitsementtegurite väärtused vastavalt üldisele segu klaasliiva sisaldusele kogu täitematerjalist. Täpsemad katsetulemused on esitatud Lisa 3.

Tabel 4.2 Vesitsementteguri määramise tulemused

Segu nr:	Segu kood:	VT	d_{kesk} [mm]
1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	0,58	148,5
2	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	0,55	147
3	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	0,56	151,5
4	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	0,56	152
5	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	0,57	154,5
6	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	0,55	154,5
7	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	0,52	149
8	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	0,5	145
9	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	0,48	149
10	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	0,55	145,5
11	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	0,56	151
12	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	0,58	148
13	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	0,64	150,5
14	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	0,54	150,5
15	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	0,54	148
16	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK	0,51	149
17	50PL-0KL-0PK-50KK-0JK	0,51	145



Joonis 4.3 Vesitsementtegurite väärtused vastavalt klaasliiva sisaldusele täitematerjalis

Võrreldes etalonseguga (segu nr 1, VT= 0,58) on enamik teistel segudel vesitsementtegur väiksem. Seda selgitab asjaolu, et peenkarvstliiva fraktsioon on 0...0,5 mm ning keskliival 0,5...1,2 mm, kuid klaasliivade fraktsioonid olid 0,5...4,0 mm. Mistõttu on terade kogupind peenliival tunduvalt suurem kui kõikidel klaasliivadel. Lisaks on klaasliival tera ümara kujuga, mis tõstab segu töödeldavus.

Sama ja/või ligilähedase fraktsiooniga kvartsliaiva asendamisel klaasliivaga tõuseb sama töödeldavuse saavutamiseks veevajadus, kuna klaasliiv imab endasse vett. Segudel nr 10-13 asendati peenliiva järjest peenklaasliivaga ning keskliiva sisaldus (50 %) jäi samaks. Asendus tehti 25% sammuga. Vesitsementteguri väärtus tõusis kui klaasliiva sisaldus tõusis. Segud nr 14-17 koosnevad kõik 50 % peenliivast ning nende puhul asendati keskliiva keskklaasliivaga 25% sammuga. Kuigi segu nr 14 ja 15 VT on võrdne, siis tegelikult on keskmise diameetri järgi näha, et diameeter kahaneb, seega segu veevajadus kasvas sama töödeldavuse jaoks kui klaasliiva pandi segusse rohkem. Sama näitab ka segude 16 ja 17 võrdlus.

Mida jämedam on klaasliiva fraktsioon, seda väiksem on veevajadus. Segudel 2-5 ning 14-17 on peenliiva sisaldus 50 %, kuid segude nr 2- 5 puhul toimus keskliiva asendus pooleks peenklaasliiva ja keskklaasliivaga, sisalduse võrdlus on toodud tabelis 4.3. Ka segude nr 2- 5 puhul on näha, et mida suuremaks läheb klaasliiva sisaldus, seda suurem

on ka vesitsementtegur. Lisaks on näha, et segudel nr 2-5 on suuremad vesitsementtegurid, kui sama kvartslüiv:klaasliiv suhetega segudel nr 14-17. Tulemus on loogiline, kuna nr 2-5 puhul koosneb klaasliiv peen- ja keskklaasliivast, segudel nr 14-17 ainult keskklaasliivast. Seega kasutatav klaasliiva fraktsioon oli väiksem ning tema terapind suurem.

Tabel 4.3 Segude 2-5 ja segude 14-17 sisalduse võrdlus

Segu nr	Segu komponendid					VT
	Peenliiv	Keskliiv	Peen klaas	Kesk klaas	Jäme klaas	
2	50,0%	37,5%	6,3%	6,3%	0,0%	0,55
3		25,0%	12,5%	12,5%	0,0%	0,56
4		12,5%	18,8%	18,8%	0,0%	0,56
5		0,0%	25,0%	25,0%	0,0%	0,57
14	50,0%	37,5%	0,0%	12,5%	0,0%	0,54
15		25,0%		25,0%		0,54
16		12,5%		37,5%		0,51
17		0,0%		50,0%		0,51

Mida väiksema fraktsiooniga ja suurema terapinnaga on klaasliiv, seda kiiremini suudab ta endasse vett imada. Kõige suurema veevajadusega (VT= 0,64) on segu nr 13, mis koosnes 50 % keskliivast ning 50 % peenklaasliivast. Sellel segul oli võrreldes teiste segudega ka kõige suurem peenklaasliiva sisaldus. Tulemust seletab asjaolu, et peenklaasliival on võrreldes teiste klaasliivadega suurem terade pindala sama mahu juures, misjuures kulub märgamisel rohkem vett ning veega kokkupuutuv pind, mis saab endasse vett imada, on suurem.

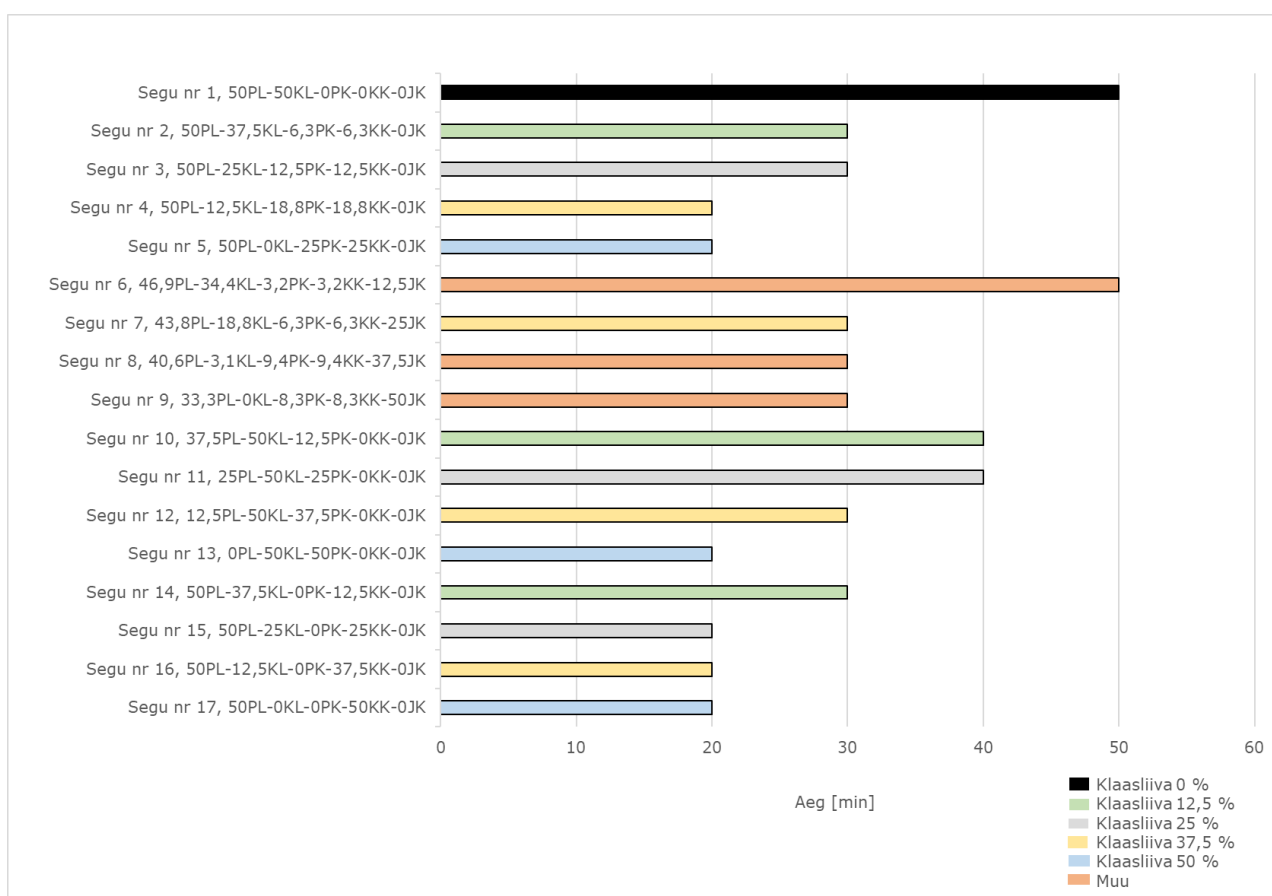
Kõige väiksema veevajadusega (VT= 0,48) on segu nr 9, mis sisaldab endas 33,3 % peenliiva, 8,3 % peenklaasliiva, 8,3 % keskklaasliiva ning 50 % jämeklaasliiva. Ehk 66,7% klaasliiva kogu täitematerjalist. Tulemustest näeme, et klaasliiva sisalduse suurenedes veevajadus väheneb. Nendes segudes on kõige rohkem jämedat klaasliiva, ja tulemus on selgitatav terastikulise koostisega. Kui keskkliiva fraktsioon jääb vahemikku 0,5...1,2 mm, siis jämeklaasliiva fraktsioon jääb vahemikku 2,0...4,0 mm ehk tegu on tunduvalt suurema fraktsiooniga. Suurema fraktsiooni liiva terapind on suurem ning laborikatsetel klaasliiv ei imanud endasse nii kiiresti nii suurel hulgal vett ning märgamist vajavat terapind on kvartslüival tunduvalt rohkem.

Vaadates joonist 4.3 on näha, et segudes, kus on klaasliiva 12,5%, on VT väärtused üsnagi sarnased (0,56; 0,56; 0,54). 50% asendamisel kvartslüivast klaasliivaga

kõiguvad vesitsementtegurite väärtused tunduvalt rohkem (0,57; 0,64; 0,51). Põhjus on erinevate klaasliiva ja kvartsliaiva fraktsioonide kasutamises.

4.2.3 Konsistentsi kao määramine

Kõikide segude konsistentsi kao määramisel kontrolliti esmalt, et töödeldavus oleks 150 ± 5 mm. Kõik saadud tulemused on esitatud lisa 4, tulemuste koondvaade on toodud välja tabelis 4.4. Joonisel 4.4 on välja toodud kõikide segude konsistentsi kadude ajad, segude koostised.



Joonis 4.4 Konsistentsi määramise kadu

Tabel 4.4 Konsistentsi kao määramise koondtulemused

		konsistentsi kadu d_{kesk} [mm]																
		SEGU NR																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
		50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK
		d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	d_{kesk}	
Aeg [min]	10	154	152	151	148	148	154	148	145	146	147	148	148	145	147	151	154	152
	20	147	135	152	137	134	145	141	144	137	146	136	137	133	138	135	141	147
	30	131	129	141	136	132	145	136	133	131	141	131	135	131	129	135	139	142
	40	128	129	141	134	132	143	138	128	128	136	126	133	126	132	132	139	139
	50	125	128	144	134	135	136	136	129	129	138	128	125	123	132	133	139	135
	60	124		137		131	137	135	124	126	127	124	131	122	131			132
	70	124		128		131	137		127	128	126	127	128					132
	80			130										122				

Kõige hiljem kaotavad oma konsistentsi segud nr 1 ja nr 6 (50 min). Seda seletab nende koostis- segu nr 1 on etalonsegu ning koosneb peen- ja keskliivast suhtega 50:50 ehk klaasliiv puudub. Segus nr 6 on klaasliiva 18,8 % kogu liiva kogusest, millest peenklaasi 3,2 %; keskklaasi 3,2% ning jämeklaasi 12,5 %. Seega jämeklaasi, mille fraktsioon on tunduvalt suurem, on kõige rohkem. Mida suuremat fraktsiooni sama mahu juures kasutame, seda vähem on terapinda, mille kaudu vett imada.

Keskliiva asendamisel keskklaasliivaga kaotab mört oma töödeldavuse palju kiiremini, segu 1 kaotab oma konsistentsi 50 minuti juures, samas kui segu 17, milles on 50% seguliivast keskklaasliiv, kaotab oma konsistentsi 20 minutiga. Peenliiva asendamisel peenklaasiga annab sama efekti, segu 1 50- minutilisest tardumisajast sai segu nr 13 puhul 20 minutit. Ka segu 5, kus keskliiv asendati peen-ja keskklaasiga, andis sama efekti.

Mida rohkem on klaasliiva segus, seda kiiremini ta enda töödeldavuse kaotab. Seda tõestavad segude nr 2- 5; 6- 9; 10- 13 ja 14- 17 tulemuste võrdlemine omavahel. Põhjus on klaasliiva omaduses imada endasse vett.

Mida suurem on kasutatava klaasliiva fraktsioon, seda aeglasemalt see endasse vett imab. Suurema tera sees on suurem kogus õhku, mis on tekkinud gaasitekitajast. Suurema diameetriga tera mahutab endasse seega rohkem vett, kuid väiksema terapinna tõttu on veega kokku puutes imava pinna pindala väiksem mahuliselt, kui

seada on sama mahuga väiksema fraktsiooniga klaasliival. Seda tõestab segude nr 6-9 tulemuste võrdlus võrreldes segudega nr 2-5, 10-13 ja 14-17. Jämeklaasliivaga segudest ükski ei jõua 20 minuti jooksul konsistentsi kaotada.

Segud nr 2-5 võrdlus nr 14-17 peaks näitama, et keskklaasliiva asendamisel peenklaasliivaga kaob konsistents kiiremini, kuid segu nr 3 katsetamisel on tõenäoliselt tehtud katse teostamisel viga. Tulemuste mõningane kõikumine võib olla käsitsi tehtud katsetamisel niisutuse erinevusest. Kõikidel katsetel pesti lusikas ning niisutati niiske lapiga koonuse ja raputuslaua pind, kuid „inimlikust veast“ tingituna on lapp mõnikord mõnevõrra niiskem või kuivem.

Võrreldes 37,5% klaasliiva sisaldavaid segusid selgub, et segudel 5 ja 17, kus on asendatud keskliiv peen- või keskklaasliiva vastu, kaotasid konsistentsi 20 minutiga. Segul 12, kus peenliiv asendati peenklaasiga ning segul 7, kus asendati kesk- ja peenliiva peen-, kesk- ja jämeklaasiga, kadus konsistents 30 minutiga. Pikemat aega seletab segul nr 7 jämeklaasliiva suurem osakaal, mis ei ima endasse nii kiiresti vett ning segul nr 12 0,0...0,5 mm fraktsiooni asendamine 0,5...1,0 mm teradega ehk vett kulus terade märgamiseks vähem ning klaasliiva veeimavusvõime ei kompenseerinud seda. Võrreldes segudega, kus on klaasliiva sisaldus 12,5%, on kõikidel suurema klaasliiva sisaldusega segudel konsistentsi kaotamise aeg kiirem.

Terastikulisel koostisel on konsistentsi kao määramise juures suur roll. Segudel 10-12 võtab konsistentsi kadumine rohkem aega kui segudel nr 2-4 ja nr 14-16, kuigi 10-12 segudes on esindatud peenklaasliiv, siis peenliiva jääb seal järjest vähemaks, ehk fraktsiooni 0,0...0,5 esindatus kahaneb.

4.2.4 Tihedus

Iga segu kohta täideti kaks vormi. Mõlema vormi puhul määrati värske mördi tihedused. 7 päevased segud olid veega immutatud ning neil määrati veega immutatud tihedus ning ruumala vees ja õhus kaalumise meetodil (peatükk 3.3.12). 21 päevased segud olid mõõtmise hetkel RH 65% ruumis kivistunud 14 päeva. Nende tiheduste arvutamisel kasutatud ruumala saadi nihikuga mõõtmise teel. Kõik mõõtmiste täpsemad tulemused on toodud lisas 5 ja lisas 6.

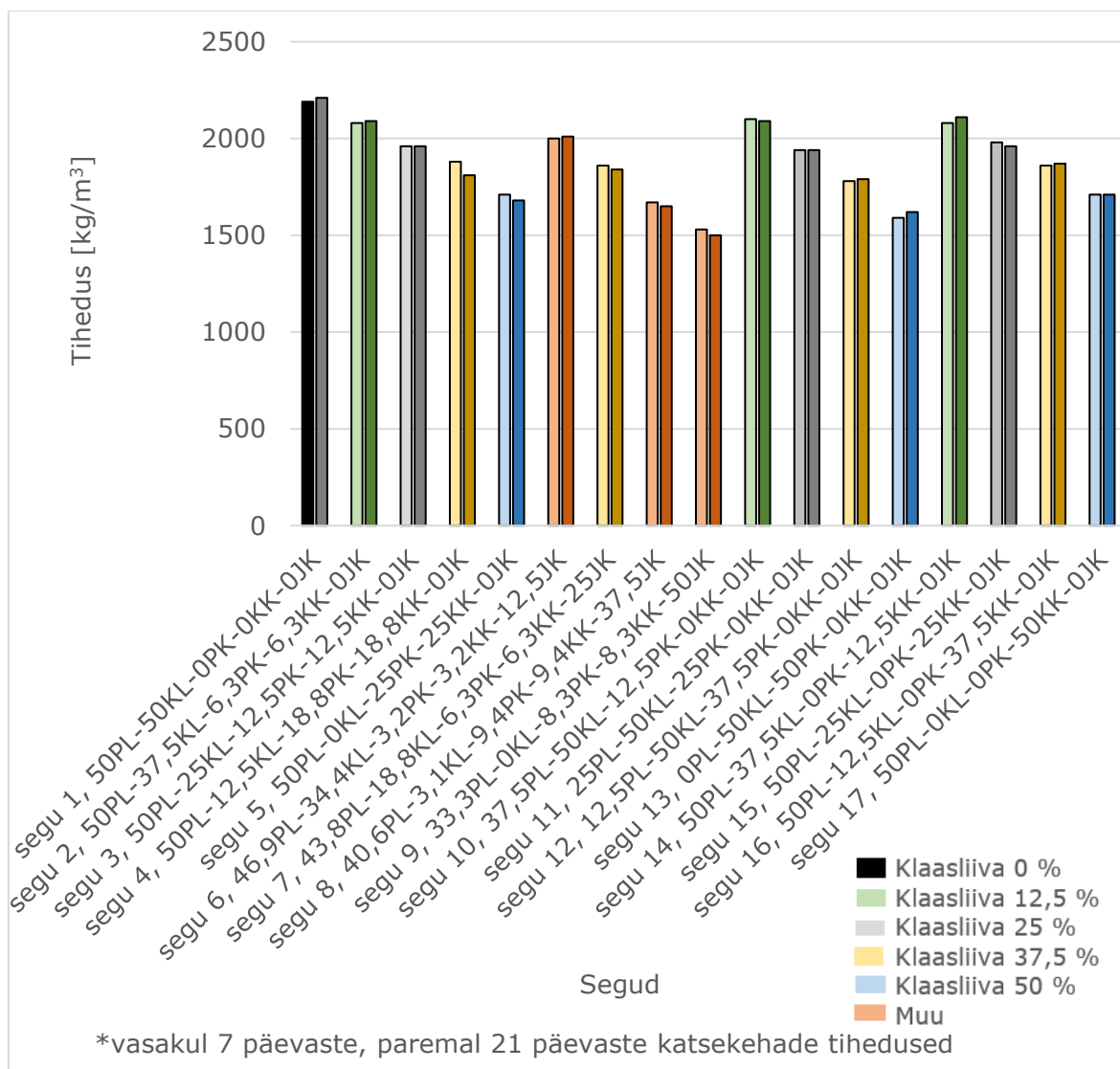
Tardumata mört

Värske mördi tihedusi tulemusi (tabel 4.6) vaadeldes on ± 10 mm võrdväärne tulemus. Ka ± 20 mm tulemuse kõikumine on aktsepteeritav, kuna ruumalad on saadud erinevatel meetoditel ning käsitsi mõõtes kõiki tühimikke ja konarusi ei arvestatud. Lisaks on kasutatud erinevaid vorme, suuremate vormide kasutamisel tuli kasutada suurema ebatäpsusega kaalu. Mõningane erinevus on tingitud ka käsitsi tihendamisest. Suurema erinevuse kui ± 30 mm puhul on 21 päeva katsekehade värske mördi tulemus elimineeritud, kuna kaalumisel saadud ruumala on usaldusväärsem. Eeldati katse viga 21 päevaste kehade värske mördi tiheduse määramisel.

Joonisel 4.5 on välja toodud tulemused koos segu koostise ja klaasliiva sisaldus mahuprotsendiga kogu täitematerjalist.

Tabel 4.5 Värske mördi tihedused

Segu nr	Kood	tihedus [kg/m ³]			
		värske mört		erinevus	ρ
		7p	21p		
1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	2210	2190	20	2200
2	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	2090	2080	10	2085
3	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	1960	1960	0	1960
4	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	1810	1880	-70	1810
5	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	1680	1710	-30	1695
6	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	2010	2000	10	2005
7	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	1840	1860	-20	1850
8	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	1650	1670	-20	2485
9	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	1500	1530	-30	1515
10	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	2090	2100	-10	2095
11	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	1940	1940	0	1940
12	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	1790	1780	10	1785
13	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	1620	1590	30	1605
14	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	2110	2080	30	2095
15	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	1960	1980	-20	1970
16	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK	1870	1860	10	1865
17	50PL-0KL-0PK-50KK-0JK	1710	1710	0	1710



Joonis 4.5 Värskete mörtide tihedused

Kõige suurem tardumata mördi tihedus saadi etalonsegul, milles klaasliiv puudub. Mida suurem on klaasliiva sisaldus segus, seda väiksem on mördi tihedus. Klaasliiva näol, on tegu paisutatud klaasiga, mille terade sees on suletud poorid. Ka katse tulemused kajastavad seda. Suurim erinevus etalonsegu värske mördi tihedusega on segul nr 9 (erinevus 685 kg/m³). Segus nr 9 on kõige suurem klaasliiva kogus (66,7% segaliivast) ning kõige rohkem jämeklaasi (50 %). Mida suurem fraktsioon, seda suurem suletud poor on tera sees ning seda väiksem tihedus.

Tulemustest nähtub, et peenklaasliiva ja keskklaasliiva vahetamisel kuni 25% ulatuses märgatavat erinevust mördi tihedusele ei avalda (segud nr 2-5 võrreldes segudega 14-17).

Lisaks joonistub väga hästi välja, et mida suurem on klaasliiva sisaldus segus, seda väiksem on mördi tihedus. Seda kirjeldab hästi, kui võrrelda segusid 2-5, 6-9, 10-13 ja 14-17.

7 päeva vanuste immutatud katsekehade tihedused

Tabelis 4.6.7 on välja toodud veega immutatud 7 päevaste ja 21 päevaste RH 65% juures katsekehade tiheduste tulemused. Täpsemad mõõtmiste tulemused on leitavad lisast 5 ja lisast 6.

Veega immutatud tihedused 7 päevastel katsekehadel samuti vähenesid, mida suuremaks läks segus olnud klaasliiva hulk (joonis 4.6). Kõige suurem tihedus oli katsekehal nr 1 (2200 kg/m^3), kus klaasliiva sisaldus on 0%, ning kõige väiksem segul nr 9 (1480 kg/m^3), kus klaasliiva sisaldus on 66,7%.

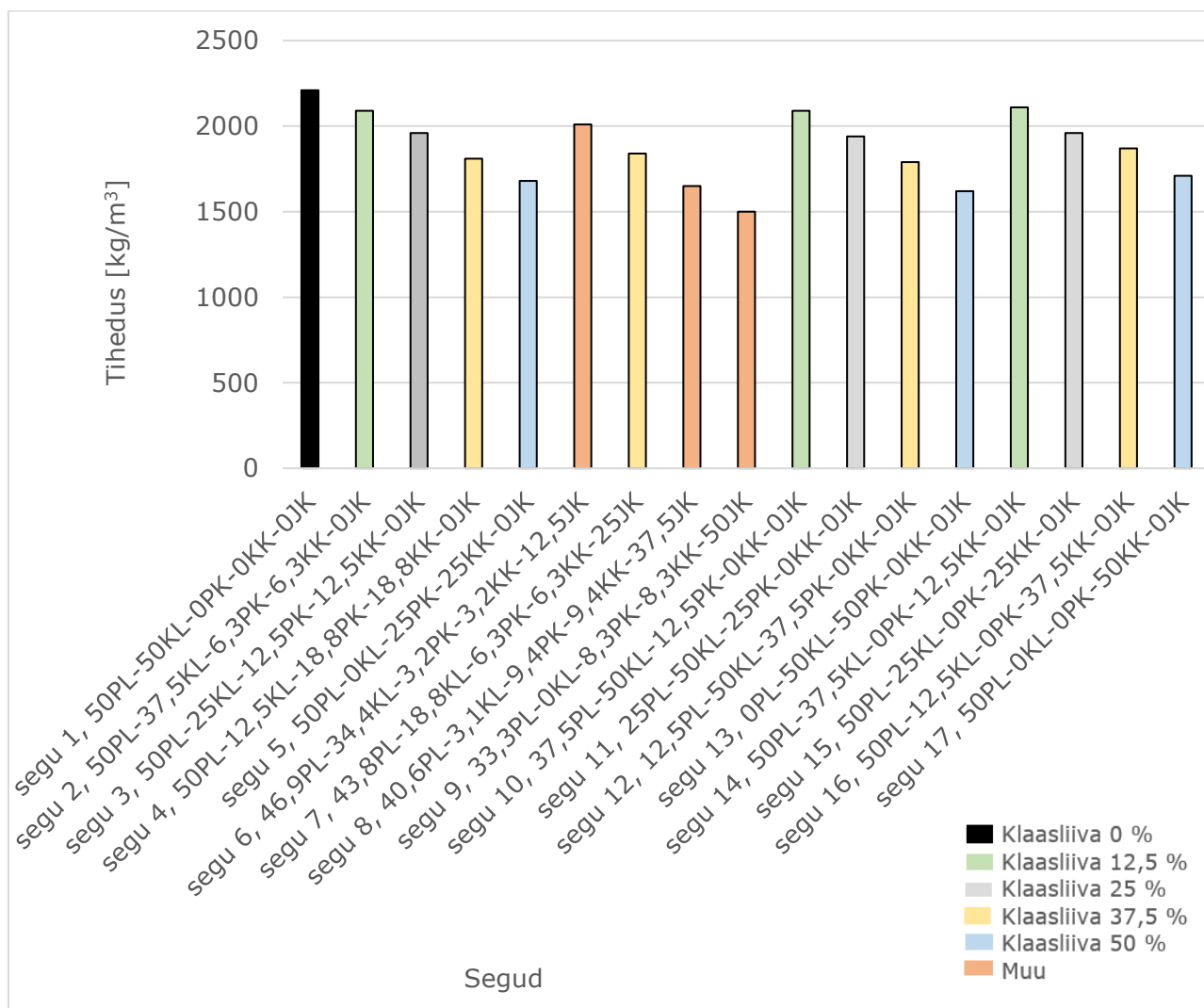
Kõikide nelja segu komplekti puhul (segud nr 2-5, 6-9, 10-13, 14-17) on näha, et mida rohkem on segus kasutatud klaasliiva, seda väiksem on 7 päeva vanuste veega immutatud katsekehade tihedused.

Kui kvartsiiva kogus segaliivast oli 50 % või alla selle, nagu seda on segudel nr 5, 8, 9, 13 ja 17, siis erinevus etalonsegust saadud veega immutatud katsekeha tihedus oli $470 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ kuni $690 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ väiksem.

Mida suurem on klaasliiva mahuline osakaal liivasegust, seda suuremat rolli mängib, milliseid fraktsioone on kasutatud. Kui klaasliiv moodustab segaliivast 12,5%, jäävad tulemused vahemikku $2080\text{-}2110 \text{ kg/m}^3$ (kõikumine 30 kg/m^3). 37,5 % klaasliiva sisaldusega segude tihedused jäid vahemikku $1790\text{-}1860 \text{ kg/m}^3$ (kõikumine 70 kg/m^3).

Veega immutatud 7 päevastel katsekehadel poole koguse kesk klaasi asendamine peenklaasiga (segud 2-5) erinevust veega immutatud katsekehade tihedustel esile ei toonud. Selgitusena võib välja tuua klaasliiva omaduse imada endasse vett ning eeldatavasti on seetõttu tihedused samaväärsed.

Lisaks täheldati tardumata mördi ja 7 päevastel veega immutatud katsekehadel on samaväärse tihedusega, kõikides $\pm 25 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ väärtuses.



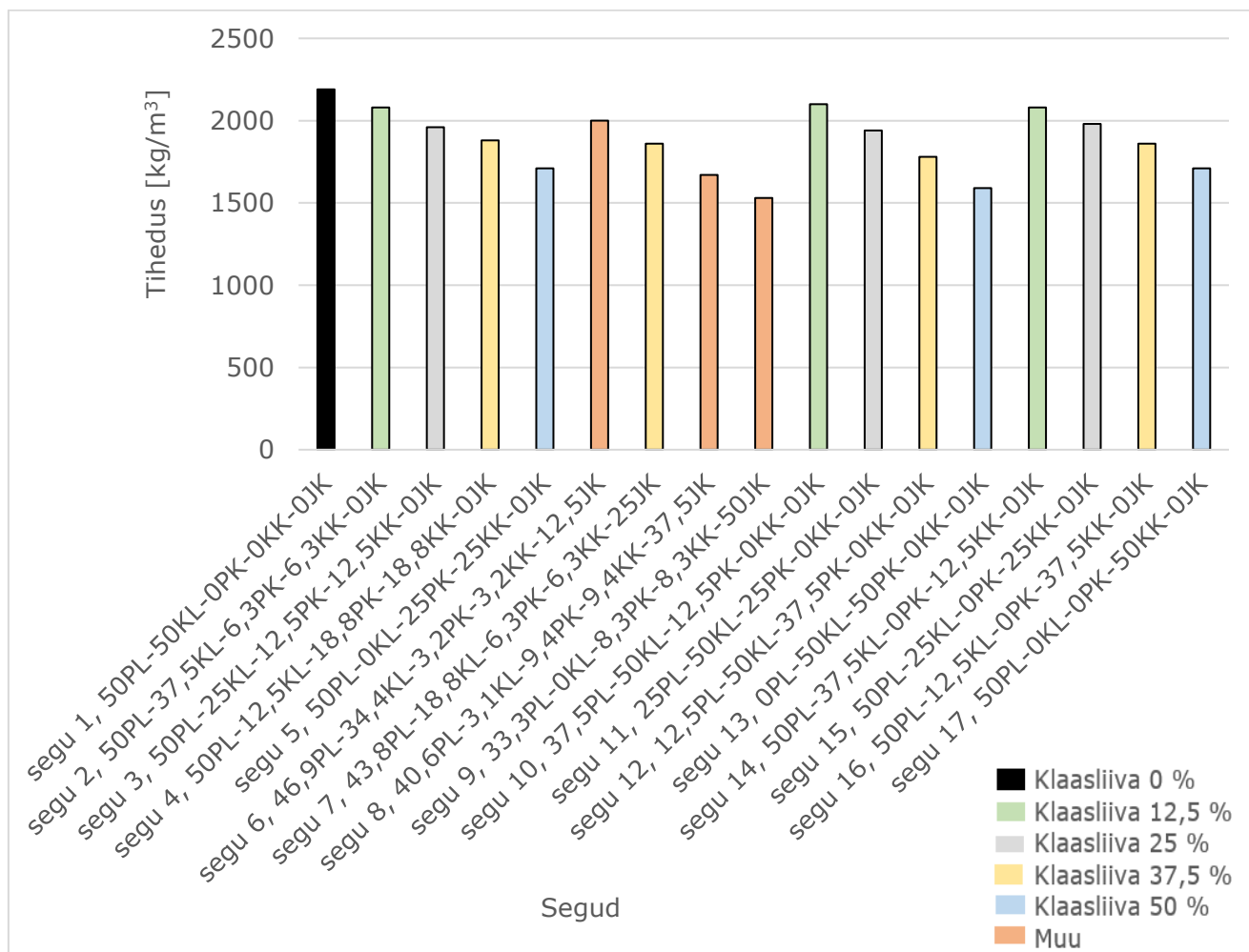
Joonis 4.6 7 päeva vanuste veega immutatud katsekehade tihedused

21 päeva vanuste RH 65 % juures määratud tihedused

21 päevaste katsete tulemustel saadi esimese, etalonsegu, mis sisaldab ainult kvartsi, tiheduseks 2100 kg/m³ (tabel 4.6). Kõikidel järgnevatel segudel on tihedus väiksem, kuna kvartsi asendati klaasliivaga ning klaasliiva näol on tegu paisutatud klaasgraanulitega (joonis 4.7). Väikseim tihedus on katsekehal nr 9, millel on kõige rohkem klaasliiva (66,7 %) ja kõige rohkem jämeklaasi (50%).

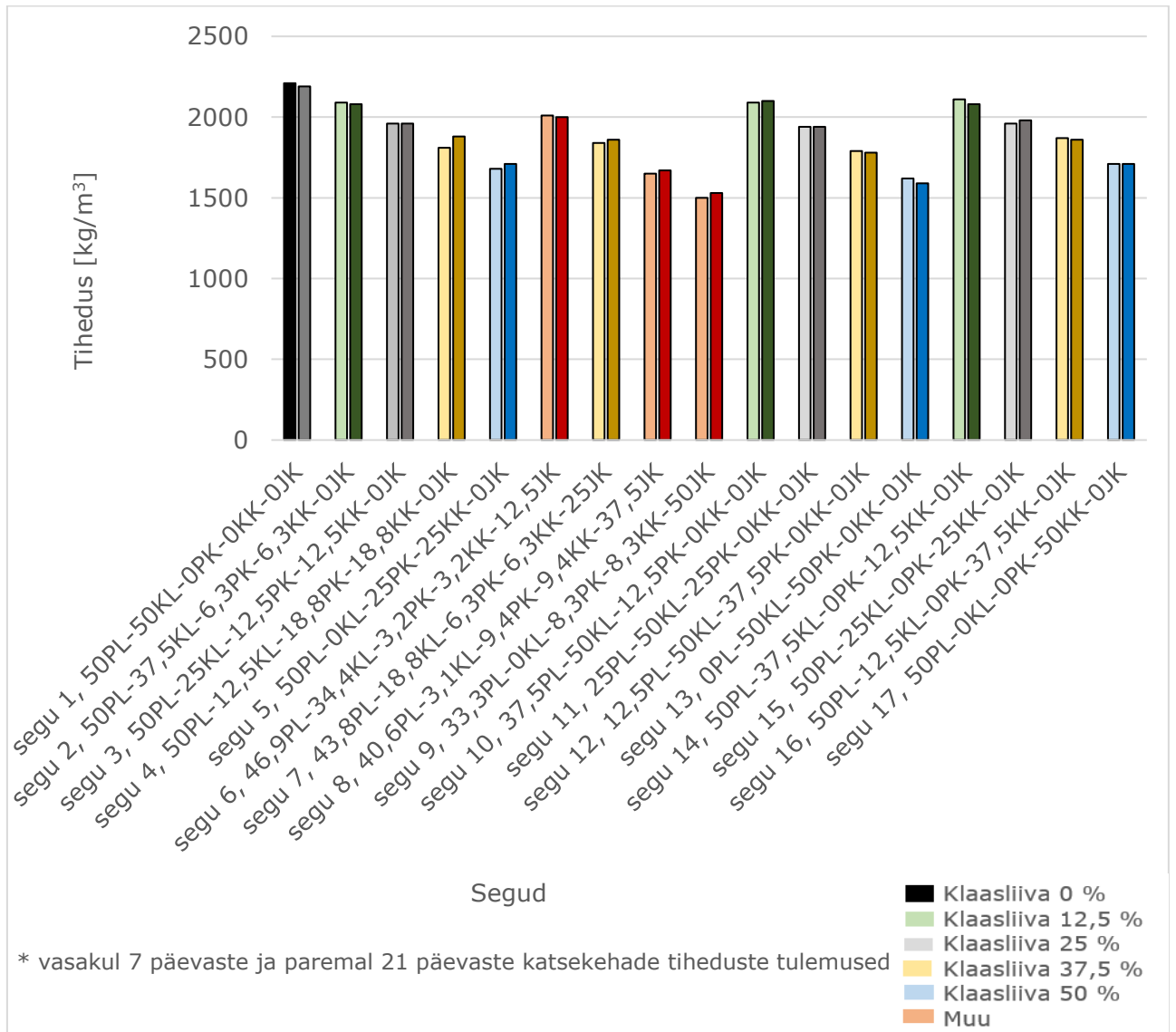
Vaadeldes etalonsegu ja segu nr 5 ning nr 17 tulemusi näeme esiteks, et tiheduste vahe 21 päevastel katsekehadel on 440 (kg/m³) ehk keskklaasliiv on tunduvalt poorem kui keskliiv. Keskklaasi ja peenklaasi seguliiv võrreldes vaid keskklaasliivaga 21 päevaste katsekehade tihedustel andis samaväärse tulemuse. Peenliiva välja vahetamisel peenklaasliiva vastu vähendame tihedust 570 (kg/m³) võrra. Peenklaasliiva tihedus kordades suurem kui peenklaasliival.

Segud, kus on klaasliiva sisalduse % võrdne, on ka võrdväärsete tihedustega. Erinevus tuleb erinevate kvarts- ja klaasliivade terastikulisest koostisest.



Joonis 4.7 21 päeva kivistunud katsekehade tihedused RH 65% juures

Kõikide segude puhul täheldati, et 21 päeva kivistunud katsekehade tihedus on mõnevõrra väiksem, kui veega immutatud tihedus (tabel 4.6, joonis 4.8). Väiksem tihedus tuleneb kapillaarpooride kaudu välja aurustunud vabast veest katsekeha sees. Idee poolest võiks järeldada, et mida suurem on erinevus veega immutatud 7 päevaste katsekeha 21 päevaste katsekehade RH= 65% tiheduste vahel, seda rohkem on kapillaarpoore on katsekehas, kuid antud väidet selles magistritöös läbiviidud katsetega tõestada pole võimalik. Puudub kinnitus, et 21 päevaks oleks kapillaarpoorides kogu vesi välja aurustunud või millise suurusega kapillaarpoorides see juhtus.



Joonis 4.8 7 päeva vanuste veega immutatud katsekehade ja 21 päeva vanuste RH 65% juures tiheduste võrdlus

Tabel 4.6 7 päeva vanuste immutatud katsekehade tihedused ja 21 päeva vanuste katsekehade tihedused RH 65% juures

Segu nr	Kood	tihedus [kg/m ³]		
		veega immutatud 7p katsekeha tihedus	21p katsekehade tihedused RH 65%	erinevus
1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	2200	2100	100
2	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	2090	2030	60
3	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	1960	1910	50
4	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	1830	1820	10
5	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	1700	1660	40
6	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	2010	1940	70
7	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	1860	1810	50
8	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	1670	1650	20
9	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	1510	1480	30
10	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	2080	2030	50
11	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	1950	1880	70
12	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	1790	1760	30
13	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	1630	1530	100
14	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	2110	2030	80
15	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	1970	1930	40
16	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK	1860	1810	50
17	50PL-0KL-0PK-50KK-0JK	1730	1660	70

4.2.5 Surve- ja paindetugevus

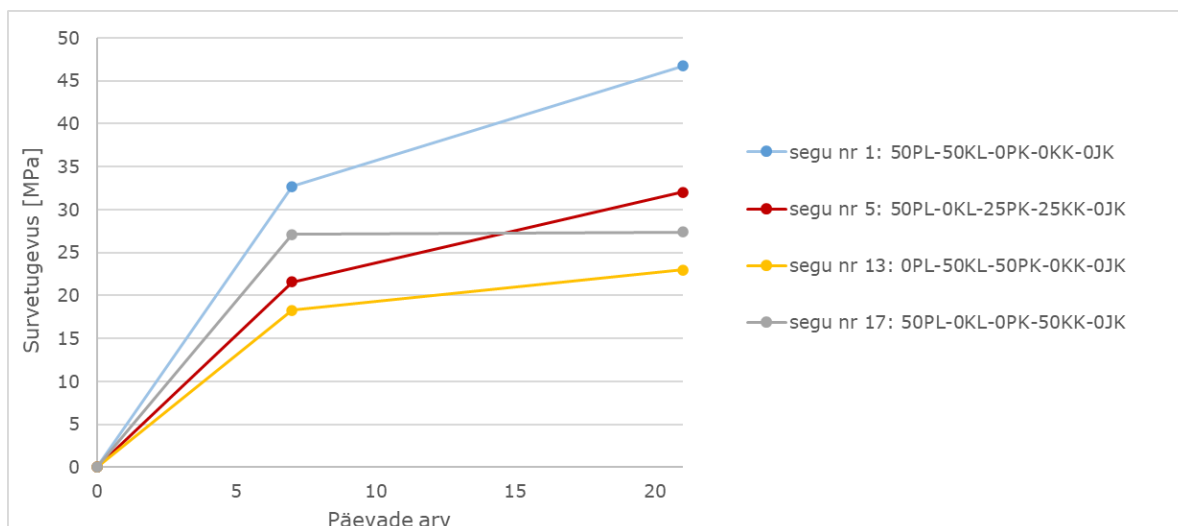
Survetugevus

Tugevuste lähteandmed on esitatud lisas 5 ja lisas 6. Tulemuste koondvaade on esitatud tabelis 4.7.

Kõige suurema survetugevuse andis segu nr 1 (7 päeva vanuselt 32,7 MPa ning 21 päeva vanuselt 46,7 MPa) ning kõige väiksema survetugevuse (7 päeva vanuselt 18,3 ning 21 päeva vanuselt 29,2 MPa) andis segu nr 13, milles on peenliiv täielikult asendatud peenklaasiga. Segu nr 1 on etalonsegu ning sellest klaasliiv puudub. Tulemused näitavad peenfraktsiooni olulisust katsekehas. Peenklaasi fraktsioon on suurem (0,5...1,0 mm) kui peenliival (0,0...0,5 mm), mistõttu segust puudub alla 0,5 mm diameetriga terad. Terade vahele jääb vaba ruumi, mis nõrgestab katsekeha.

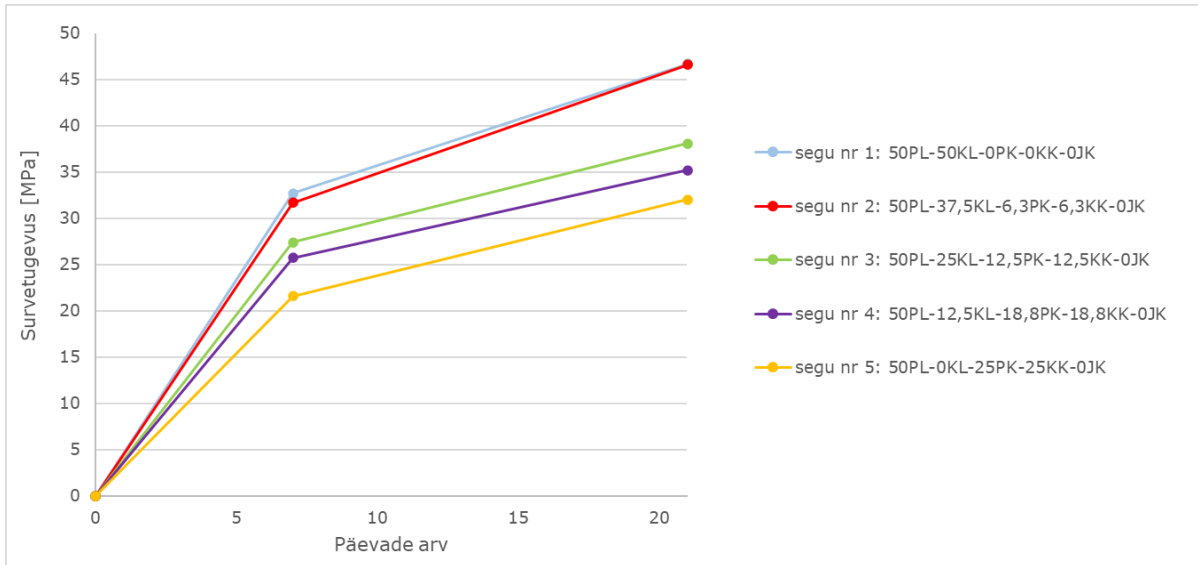
Keskmiselt saavutasid 7 päeva vanused kehad võrreldes 21 päeva vanuste kehade survetugevustega ~73 % survetugevusest.

Segudes 5, 13 ja 17 on klaasliiva 50% seguliiva mahust. Segude omavaheline võrdlus koos etalonseguga on toodud joonisel 4.9. Nr 5 segu on tugevam kui 13. Seda seetõttu, et segu nr 13 puudub peenliiv, kõige väiksem täitematerjali fraktsioon on 0,5 mm. Segus nr 5 on aga kasutatud 50 % peenliiva, mille fraktsioon on 0,0...0,5 mm. Segul nr 17 on 7 päevaste survetugevuste määramisel tehtud viga, sellele viitab 7 päevaste ja 21 päevaste katsekehade praktiliselt olematu keskmiste survetugevuste kasv ning see, et ta on suurem kui segu nr 5 survetugevus, kuid segul viis on klaasliiva kogusest 50% väiksema fraktsiooniga kui segul nr 17. 21 päeva tulemused on kõikidel segudel loogilises järjekorras. Nõrgeim segu nr 13 (23,0 MPa), kus peenliiv puudub ja on 50% peenklaasi. Mõnevõrra tugevam on segu nr 17 (27,4 MPa), mis sisaldab 50% peenliiva ja 50% keskliiva. Seega peenliiva osakaal segu koostises mängib suuremat rolli segu survetugevuses, kui klaasliiva erinevad fraktsioonid. See on seotud erinevate liivade erinevate teratihedustega.



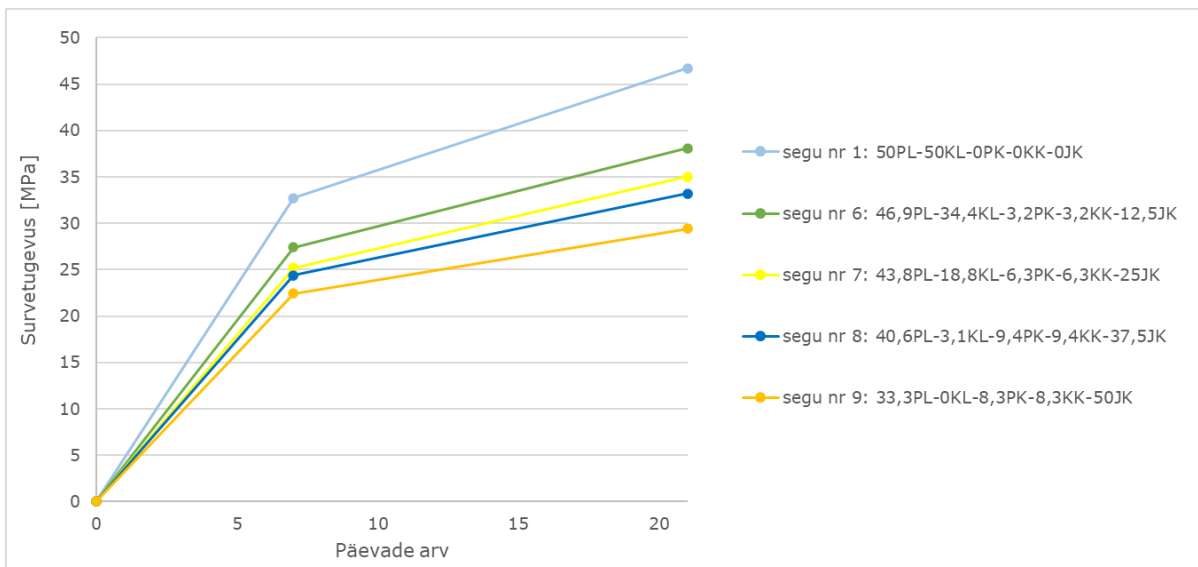
Joonis 4.9 Etalonsegu, segu nr 5, 13 ja nr 17 survetugevused

Segude nr 2 kuni 5 koos etalonsegu omavahelise võrdlusega on toodud joonisel 4.10. Segude 2-5 vahetatakse keskliiv peenklaasi vastu välja 25% sammuga. Etalonsegu ja segu nr 2 vahel eriti suurt erinevust survetugevuste tulemuste vahel ei ole. Segul nr 1 seitsme päeva vanuselt saadi survetugevuseks 32,7 (MPa), segul 2 31,7 (MPa). 21 päeva vanused tulemused olid vastavalt 46,7 (MPa) ja 46,6 (MPa). Seega kui keskliiva vahetada väikeses portsendis (12,5 % mahuliselt), siis survetugevusele see märgatavat suurt mõju ei avalda. Jooniselt 4.10 on näha, et mida suurem on klaasliiva sisaldus, seda väiksemaks muutub segu survetugevus.

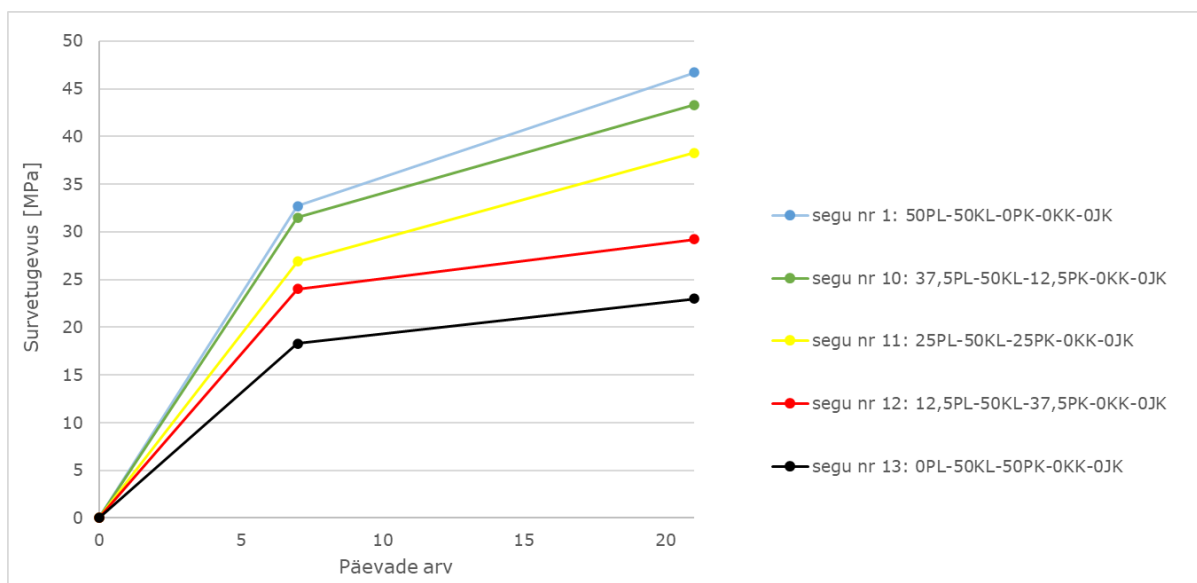


Joonis 4.10 Segude 2-5 ja etalonsegu survetugevused

Segude nr 6-9 ning etalonsegu ja nr 10-13 ning etalonsegu tulemuste võrdlus (joonis 4.11 ja joonis 4.12) andis oodatavaid tulemusi. Kõik neli klaasliiva sisaldavat segud jäid etalonsegust katsekehade survetugevustele alla, ning mida suurem oli klaasliiva sisaldus, seda nõrgemaks jääb katsekehade tugevus. Jooniste sirgete tõusu vaatlusest nähtub, et mida rohkem on segus klaasliiva mahuliselt, seda aeglasem on ka tugevuse kasv 7 päeva ja 21 päeva vahel.

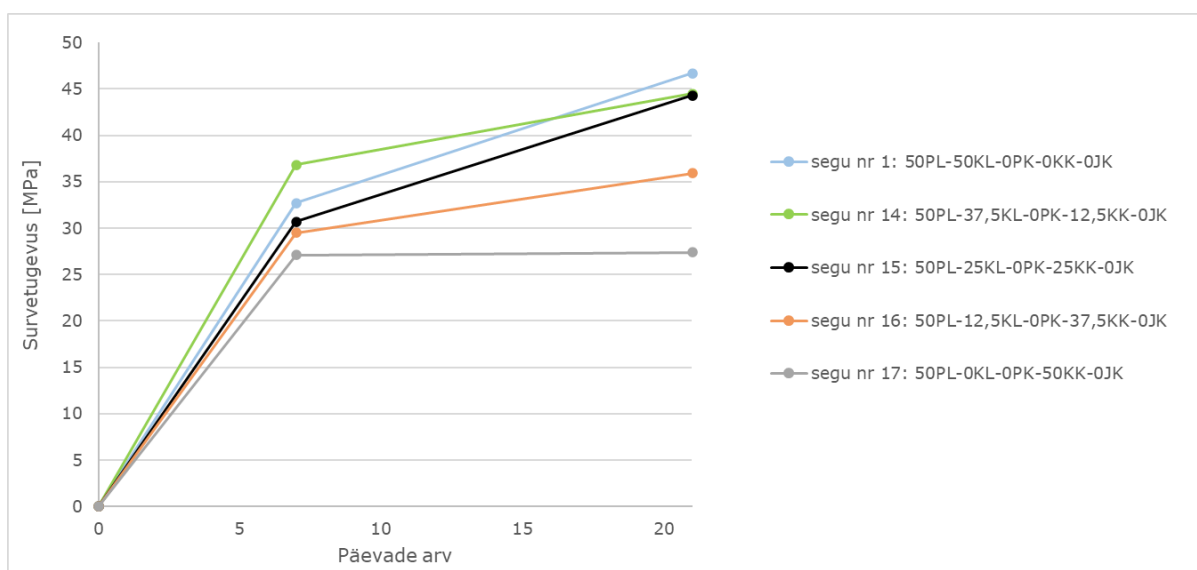


Joonis 4.11 Segude 6-9 ja etalonsegu survetugevused



Joonis 4.12 Segude 10-13 ja etalonsegu survetugevused

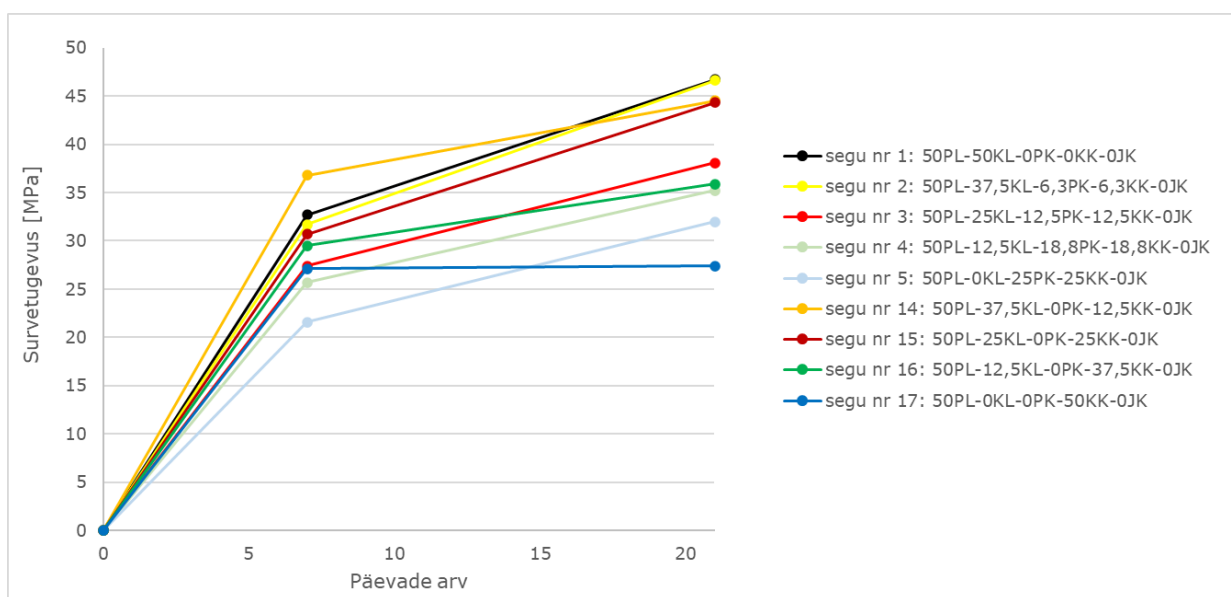
Segude nr 14-17 võrdlusest etalonseguga on näha, et katsete tulemused on mõnevõrra kahtlust äratavad ja katseid tuleks kindluse huvides veel korra korrata (joonis 4.13).



Joonis 4.13 Segude 14-17 ja etalonsegu survetugevused

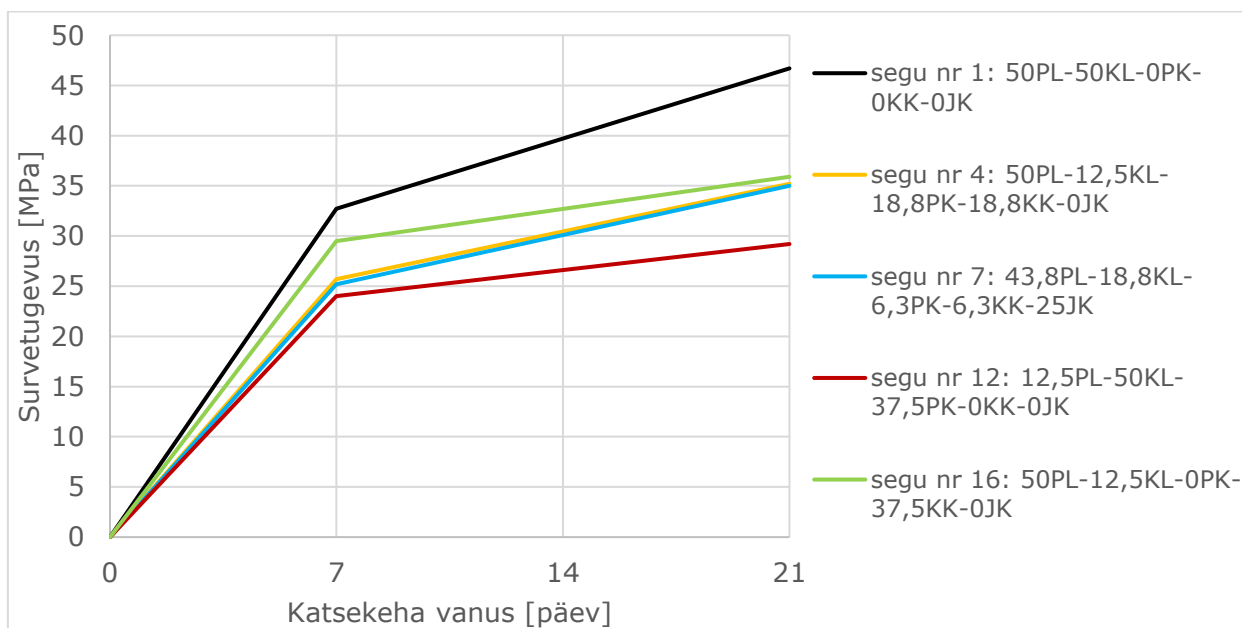
Tulemuste mõistmiseks on toodud välja joonisel 4.9 segude „komplekte“ nr 2-5 ja nr 14-17 omavaheline võrdlus. Koostise järgi on tegu sarnaste segudega. Võrrelda saab 2 14-ga, 3 15-ga, 4 16-ga ja 5 17-ga. Erinevus seisneb selles, et ühel asendatakse keskliiva 50: 50 suhtega peenklaasliiva ja keskklaasliivaga, teisel 100 % keskklaasliivaga (tabel 4.3). Eeldatavalt peaksid segudest nr 2-5 valmistatud katsekehad olema mõnevõrra tugevamad, kui nr 14-17 segudest katsekehad.

Keskliivliiva fraktsioon on suurem ja sisaldab suuremat suletud poori, mis nõrgestab katsekeha. Üldpildis aga katsetulemused vastandusid hoopis eelpool mainitud loogikale. Seega lisaks tera tugevusele ning täitematerjali ja tsemendivahelise nakkepinna suurusele määrab katsekehade tugevusomadusi ka tsemendi ja terade pindala suhe. Asendades keskliiva, mille fraktsioon on 0,5...1,2 mm, peenliivaga, mille fraktsioon on 0,5...1,0 mm, ei ole sama tsemendi koguse juures terade pind tsemendiga kaetud ning seetõttu viib peenliivliiva lisamine hoopis tugevuse alla.



Joonis 4.14 Segude 2-5, 14-17 ja etalonsegu survetugevused

Etalonsegu ja katsekehade, mille segude segaliiv koosnes 37,5% klaasliivast, survetugevuste tulemused on toodud joonisel 4.15. Klaasliiva suurem sisaldus segus viib katsekeha survetugevust alla. Lisaks sõltub katsekeha survetugevuse väärtus ka paljuski sellest, kas vahetame välja keskliiva või peenliiva. Mistõttu seguga nr 12 tehtud katsekeha survetugevus on märgatavalt väiksem kui segudel 4, 7 ja 16. Segude nr 4, 7 ja 16 tulemuste võrdlusest saame järeldada, et see, millise fraktsiooniga keskliiv välja vahetatakse, 21 päeva vanusele katsekehal ei mõjuta enam.



Joonis 4.15 Etalonsegu ja katsekehade, mille segaliiv 37,5% klaasliiv, survetugevused

Paindetugevus

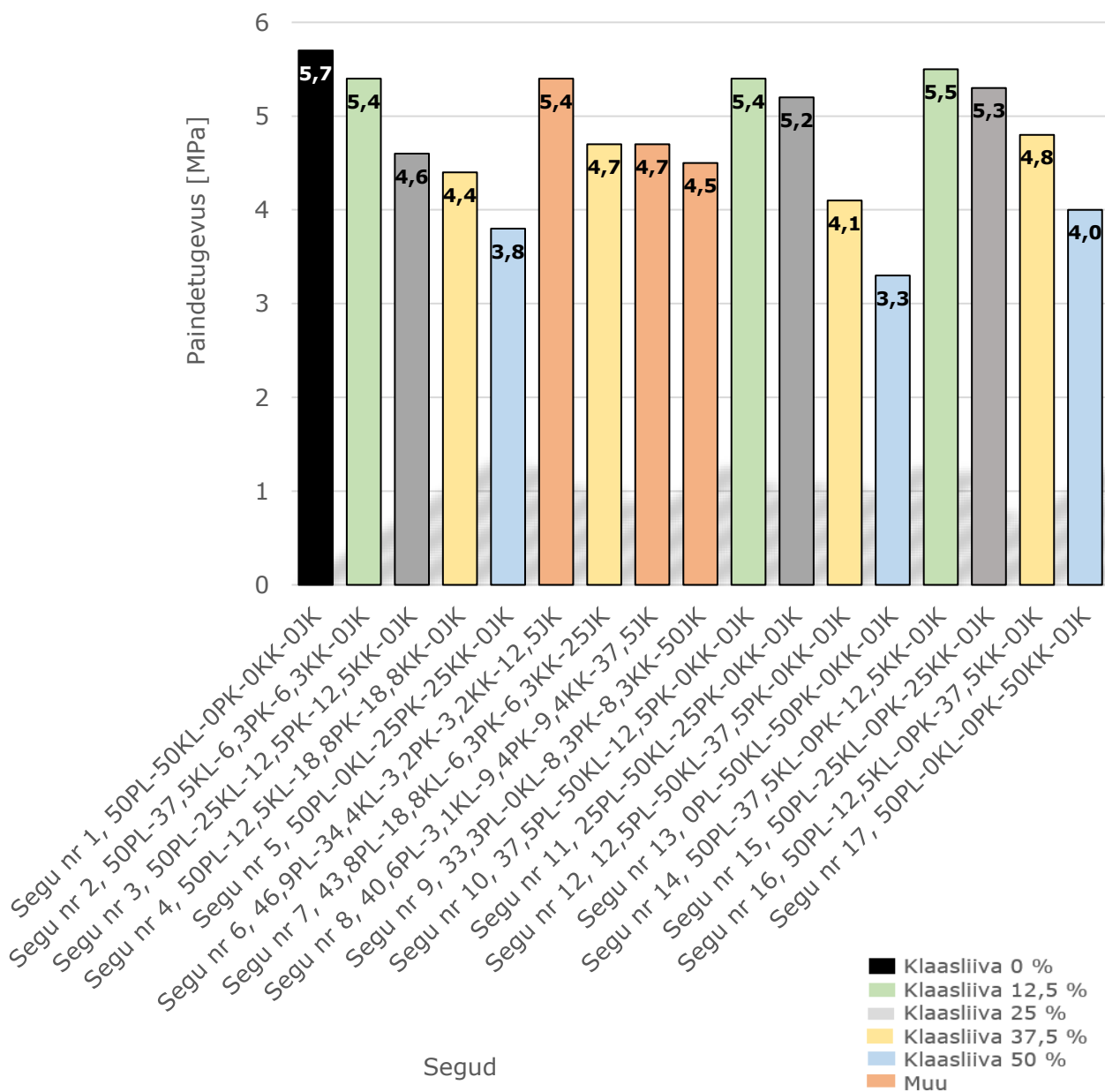
Paindetugevuste tulemuste alusel on koostatud tulpdiaagramm (joonis 4.16), millelt joondub selgelt välja, et mida suurem on klaasliiva sisaldus katsekehas, seda väiksem on tema paindetugevus. Lisaks on paindetugevuste tulemused samaväärsete klaasliivasisaldusega katsekehadel ($\pm 1 \text{ kg/m}^3$) samaväärsed ($\pm 1 \text{ MPa}$).

Sarnaselt survetugevusele, suurim paindetugevus (5,7 MPa) on etalonsegul, kus puudub klaasliiv. Vähim survetugevus (3,3 MPa) on segul nr 13, kus peenliiv on asendatud peenklaasiga (klaasliiva sisaldus 50%). Tulemused näitavad peenfraktsiooni olulisust katsekehas. Peenklaasi fraktsioon on suurem (0,5...1,0 mm) kui peenliival (0,0...0,5 mm) ning seega jääb terade vahele vaba ruumi, mis nõrgestab katsekeha.

Segudel, milles on klaasliiva 12,5% segaliivast, on samaväärne paindetugevus (5,4-5,5 MPa). 37,5 % klaasliiva mahuliselt segaliivas sisaldavate katsekehade paindetugevused kõiguvad vastavalt terastikulisele koostisele. Segude 16 (4,8 MPa) ja 4 (4,4 MPa) võrdlusest järeldub, et kuigi katsekehade paindetugevuse määrab tera tugevus ning täitematerjali ja tsemendivahelise nakkepinna suurus ja peenklaasil on suurem terapind, siis tugevusomadusi määrab ka tsemendi ja terade pindala suhe. Segude 50PL-37,5KL-0PK-12,55KK-0JK, 50PL-25KL-0PK-25KK-0JK, 50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK, 50PL-0KL-0PK-50KK-0JK paindetugevused on mõnevõrra suuremad kui vastavatel segudel 50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK, 50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK, 50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK, 50PL-0KL-25PK-25KK-0JK. Seega asendades keskliiva, mille

fraktsioon on 0,5...1,2 mm, peenliivaga, mille fraktsioon on 0,5...1,0 mm, ei ole sama tsemendi koguse juures terade pind tsemendiga kaetud.

Segude nr 6-9 komplekti paindetugevuste võrdlemisel teiste segude komplektidega (2-5, 10-13, 14-17) saame järeldada, et paindetugevus on kasutatud fraktsioonist. Segus, kus on kõige rohkem klaasliiva % mahuliselt segaliivast (66,7 %) andis parema tulemuse, kui segu nr 12 (klaasliiva 50% mahust). Põhjus seisneb terastikulisel koostisel. Segu 9 koosneb 33,3 % peenliivast (0,0...0,5 mm), samas kui segu nr 13 leidub fraktsiooni 1,0...1,2 mm.



Joonis 4.16 21 päeva vanuste katsekehade paindetugevuste tulemuste tulpdiaagramm

4.2.6 3D prinditavus

Esialgse katseplaani järgi oli autoril plaan printida segud nr 1, 9, 13 ja 17. Selleks valmistas autor ette kuivsegud vastavalt punktidele 3.3.4. Esimesel printimiskatse teostamisel sai prinditud segu nr 9 ning proovitud printida said segud nr 13 ja 17, kuid betooniprinteri tehnilise rikke tõttu segude nr 13 ja nr 17 printimine ebaõnnestus. Kuivsegu nr 1 segistisse printimise katseks ei jõudnud. Ka teisel katsel pärast printeri pumba remonti printimine ebaõnnestus tehnilise rikke tõttu. Joonisel 4.12 on väljavõtte printimise seadmetest.

Ilmnesid mõningad tähelepanekud:

- Veevajadus laborikatsetel saadi üks, kuid printimisel veevajadus suurenes. Selle põhjus seisneb selles, et printer pressib printimise protsessi käigus klaasliiva sisse vett ja segu konsistents muutus liiga väikseseks. Peenklaasi puhul ei olnud muutust märgatav, kuid segu nr 9, milles on jämeklaasi kõige rohkem, oli vaja lisada +0,35L 75L kuivsegu kohta. Kuivsegu nr 9 vesitsementtegur, seega 75 l kohta tuli lisada vastavalt laborikatsele 12,96 kg ehk 12,96 l vett. Seega juurde lisati 2,7 % veest.
- Paisutatud klaasliiva kasutamisel segus tõuseb klaasliiv pinnale, ujub (vaata joonis 4.18). Mistõttu paisutatud klaasliiva printimisel segu ei ole homogeenne. Samasuguste omadustega konstruktsiooni printimiseks tuleb kasutada lisandeid.
- Kuigi kuivsegu sai mahuliselt valmistatud samas koguses (75 L), siis kuivsegule vett lisades selgus, et mördi kogused olid/tulid erinevad



Joonis 4.17 Printimise ettevalmistuste väljavõte



Joonis 4.18 Segu nr 9 segumasinas

JÄRELDUSED

Töö tulemusena on tehtud järgmised järeldused:

- Katse tulemused kinnitavad paisutatud klaasliiva suurt veeimavust.
- Mida suurema fraktsiooniga täitematerjali kasutada, seda suurem on segu töödeldavus sama vesitsementteguri juures. Suurema fraktsiooniga teradel on väiksem terade pindala ning vett kulub terade märgamiseks vähem.
- Mida suurem osakaal on segaliivas klaasliival, seda kiiremini segu oma töödeldavuse kaotab. Põhjus on klaasliiva omaduses imada endasse vett.
- Mida väiksema fraktsiooniga ja suurema terapinnaga on klaasliiv, seda kiirem on veeimavus. Mida suuremat fraktsiooni sama mahu juures kasutada, seda vähem on terapinda, mille kaudu vett imada.
- Mida jämedam on klaasliiva fraktsioon, seda väiksem on veevajadus, kuna terade pindala, mida katta ning mis imaks vett, on väiksem.
- Kuna katsetes kasutatud fraktsioonide erinevus on suur, siis tuleb uurida täiendavalt, millise terastikulise koostisega alates klaasliiva vett imav mõju laboratoorsetes katsetes kajastuma hakkab.
- Mida suurem on klaasliiva osakaal segaliivas, seda väiksem on tihedus. Paisutatud klaasliiva terad on suletud pooriga, seega sisaldavad nad endas õhku ning nende terade tihedus on kordades väiksem kui kvartzliival.
- Paindetugevus sõltub terastikulisest koostisest. Paindetugevuse määrab tera tugevus ning täitematerjali ja tsemendivaheline nakkepinna suurus. Mida suurem osa täitematerjali terade pinnast on tsemendiga kaetud, seda suurem on paindetugevus.
- Terastikulisel koostisel on konsistentsi kao määramise juures suur roll. Mida väiksema fraktsiooniga ja suuremas koguses paisutatud klaasliiva kasutame, seda kiiremini klaasliiv endasse vett imab, seda kiiremini segu oma konsistentsi kaotab.
- Mida suurem on klaasliiva osakaal seguliivas, seda väiksem on katsekeha survetugevus. Põhjuseks on paisutatud klaasliiva kordades väiksem tihedus kui kvartzliival.

- Paisutatud klaasliivaga betoonisegu vajab printimiseks lisandeid, kuna klaasliiv on ujuv materjal ning vastasel juhul tõuseb segu pinnale.
- Klaasliiva eelistamine kvartsliidale vähendab süsinikdioksiidi jalajälge, kuid arvestades juurde ka tsemendi mõju, siis mõju on väike. 1 m³ segus väheneb süsinikdioksiidi ekvivalent vaid 5%. Tegelikku paisutatud klaasliiva keskkonnajalajälge tuleb uurida täiendavalt. Hetkel puudub täpne EPD arv talle.
- Lisaks tera tugevusele ning täitematerjali ja tsemendivahelise nakkepinna suurusele määrab katsekehade tugevusomadusi ka tsemendi ja terade pindala suhe. Asendades keskliiva, mille fraktsioon on 0,5...1,2 mm, peenliivaga, mille fraktsioon on 0,5...1,0 mm, ei ole sama tsemendi koguse juures terade pind tsemendiga kaetud ning seetõttu viib peenklaasliiva lisamine hoopis tugevuse alla.
- Peenfraktsiooni (0,0...0,5 mm) asendamisel suurema fraktsiooniga viib katsekeha tugevusomadusi alla, kuna segus jääb terade vahele vaba ruumi, mis nõrgestab katsekeha.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö „Klaaskergetäitematerjaliga 3D printimisbetooni koostise väljatöötamine“ esimeses osas uuriti printimisbetooni segu koostisosi, täiendatult kvartslüiva ja klaasliiva, ning tardumata ja kivistunud betoonisegu omadusi. Teises osas uuriti kvartslüiva asendamise mõju klaasliivaga keskkonnale ning kolmas ja neljas osa hõlmavad endas vastavalt katsete kirjeldust ja tulemusi koos analüüsiga.

Klaaskergetäitematerjali mõju uurimiseks ja sellega 3D printimisbetooni koostise väljatöötamiseks tehti katseid 17 erineva seguga, kus kõikides oli mõnevõrra erinev segaliiva koostis. Segudele määrati veevajadus, konsistentsi kadu, tihedus (tardumata mördi, 7 päeva vanuste veega immutatud katsekehade ja 21 päeva vanuste katsekehade RH 65% juures), surve- ja paindetugevus ning selgitati välja ka 3D printitavus mõningate segudega. Lisaks määrati täiematerjalide terastikuline koostis.

Katsete käigus selgus, et paisutatud klaasliivaga betooniseguga ei ole võimalik saavutada homogeensete omadustega konstruktsiooni. Seda kahel põhjusel:

- 1) võrreldes laborikatsetega, printides segu veevajadus tõuseb, kuna printer pressib printimise protsessi käigus klaasliiva sisse tsemendipastas sisalduvat vett ja segu konsistents muutusvähemaks;
- 2) klaasliiva väikese tera tiheduse ja suletud poori tõttu tõusevad need segu pinnale.

Kõik katsed näitasid klaasliiva mõju segule võrreldes tavalise kvartslüivast koosneva seguga. Vaatamata sellele tuleb autori arvates paisutatud klaasliiva omadusi veel täiendavalt uurida, kuna hetkel on klaasliivast endast ja tema mõjust teada suhteliselt põgusalt, et seda hooneid printides kasutada. Lisaks oleks vaja välja töötada täpsemad standardid tugevuste, külmakindluse, kulumiskindluse ja teiste betoonkonstruktsioonide seisukohalt oluliste omaduste arvutamiseks. Üldpildis näeb autor klaasliivas alternatiivi tavaehituses segades kvartslüivaga.

Keskkonna jalajälg väheneb, kui kasutada kvartslüiva asemel paisutatud klaasliiva. Paisutatud klaasliiva kasutamine aitab vähendada klaasjäätmete teket, mis looduses ei biolagune. Tuleb mõelda, et kvartslüiva puhul on tegu loodusliku ressursiga ning seda ei jätku lõpmatuseni. Täpset EPD arvu ei ole hetkel välja uuritud ning hetkel on info suhteliselt põgus paisutatud klaasliiva ja klaasliivaga printimise keskkonnamõju kohta. Tsemendi osakaal printimisbetoonisegus ning tema mõju süsinikujalajäljele on niivõrd suur, et isegi 1 m³ segu 66,7% kvartslüiva asendamisel klaasliivaga süsinikdioksiidi

ekvivalent väheneb vaid 5%. Kuigi klaasliiva süsinikdioksiidi ekvivalent on 5 korda väiksem kui klaasliival. Autor on kasutatud klaasliiva EPD arvu osas skeptiline, kuna tegelikult peab seejuures arvestama ka seda mõju, et klaasliiva kasutamisega muutuvad konstruktsiooni tugevusomadused väiksemaks, mistõttu sama tugevusomadusega konstruktsiooni saamiseks tuleb mõõtmed peaksid suurenema. Lisaks vajab betooni printimine erinevaid seadmeid ning nende seadmete välja töötamine, transport jne samuti eraldavad CO₂-te. Prinditava ja homogeense segu saamiseks tuleks kasutada lisandeid, mis tõstavad samuti süsinikdioksiidi jalajälge.

SUMMARY

In the first part of this master's thesis, titled "Development of a 3D printing concrete composition with glass aggregate material," the ingredients of the printing concrete mixture were investigated, supplemented with quartz sand and glass sand, as well as the properties of both fresh and hardened concrete mixtures. The second part examined the impact of replacing quartz sand with glass aggregate material on the environment, while the third and fourth parts respectively encompass the description and results of the experiments, along with the analysis.

To investigate the impact of glass aggregate material and develop the composition of 3D printed concrete using it, experiments were conducted with 17 different mixtures, each having slightly different proportions of the aggregate material. The water requirement, consistency loss, density (for fresh mortar, 7-day water-saturated specimens, and 21-day specimens at 65% relative humidity), compressive and flexural strength were determined for each mixture. Additionally, the printability of certain mixtures was evaluated. Furthermore, the steel fiber composition was determined for the complete materials used.

During the experiments, it was found that it is not possible to achieve a structurally homogeneous construction using a concrete mixture containing expanded glass aggregate. This is due to two reasons:

- 1) Compared to laboratory tests, when the mortar is printed, the water requirement increases because the printer compresses the water contained in the cement paste while printing, resulting in a lower consistency of the mixture.
- 2) Due to the low density and closed porosity of the small-grained glass aggregate material, the material rises to the surface of the mixture.

All experiments showed the influence of the glass aggregate material in the mixture compared to a conventional mixture composed of quartz sand. Despite this, the author believes that the properties of expanded glass aggregate need further investigation because currently, there is relatively limited knowledge about the sand itself and its effects when used in the 3D printing for constructing buildings. Additionally, more precise standards need to be developed for calculating strengths, frost resistance, abrasion resistance, and other important properties of concrete structures. Overall, the author sees expanded glass aggregate as an alternative to conventional quartz sand when mixed in traditional construction.

The environmental footprint is reduced if expanded glass aggregate material is used instead of quartz sand. The use of expanded glass aggregate material helps to reduce the generation of glass waste, which does not biodegrade in nature. It is important to consider that quartz sand is a natural resource that is not limitless. The exact Environmental Product Declaration (EPD) value has not been researched yet for expanded glass aggregate material and the information regarding the environmental impact of printing with expanded glass material is relatively limited. But it is known that the cement content in the printing concrete mixture and its impact on the carbon footprint are significant. Even with a 66.7% replacement of quartz sand with expanded glass aggregate in a 1 m³ mixture, the reduction in carbon dioxide equivalent is only 5%. Although the carbon dioxide equivalent of expanded glass aggregate material is five times lower than that of quartz sand, the author remains skeptical about the EPD values for expanded glass material used in the study. This is due to the use of expanded glass aggregate material can result in a decrease in the structural strength properties, necessitating larger dimensions to achieve the same level of strength. Additionally, concrete printing requires various equipment, and the development, transportation, and operation of these devices also generate CO₂ emissions. Additives are often used to achieve printable and homogeneous mixtures, which can also contribute to an increased carbon footprint. It is important to conduct further research and analysis to gain a more comprehensive understanding of the environmental impact and sustainability aspects related to the use of expanded glass aggregate material in concrete printing.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. M. Pogga, juhendaja T.Tuisk, „3D printimisbetooni koostise alusuuring“.
2. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus „EVS-EN 206:2014+A2:2021 – Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus“.
3. L.-M. Raado, Ehitusmaterjalid. Tallinn: Professor Karl Õigeri Stipendiumifond, 2018.
4. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 197-1:2011 – Harilike tsementide koostis, spetsifikatsioonid ja vastavuskriteeriumid“.
5. Kunda Nordic Tsement AS, „Komposiittsement. “
<https://www.knc.ee/et/komposiittsement-0>.
6. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 12620:2005+A1:2008 – Betooni täitematerjalid“.
7. EN 13055-1:2002 ja EN 13055-1:2002/AC:2004 „Kergtäitematerjalid. Osa 1: Betooni ja mördi kergtäitematerjalid“.
8. JSC Stikloporas, „Expanded glass | Stikloporas.“
<https://stikloporas.com/expanded-glass> (accessed March 15, 2023).
9. JSC Stikloporas „Application | Stikloporas.“
<https://stikloporas.com/application> (accessed March 15, 2023).
10. “The Role of Aggregate in Concrete Countertop Mix Designs,” The Concrete Countertop Institute. <https://concretecountertopinstitute.com/free-training/the-role-of-aggregate-in-concrete-countertop-mix-designs/>.
11. Betoonimeister, „Betooni lisandid.“ <https://betoonimeister.ee/beton/betooni-lisandid/>
12. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 1008:2002 – Betooni seguvesi“.

13. A. Truong, „State-of-the-Art Review on 3D Printing Technology Applications in Construction“. *UC Irvine*, 2019, <https://escholarship.org/uc/item/4m27c4xs>.
14. 3D printing.com, „What is 3D printing? How does a 3D printer work? Learn 3D printing | 3D printing.com.“ <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/> (accessed March 1, 2023)
15. F. Heidarneshad, „Shotcrete based 3D concrete printing: State of art, challenges, and opportunities,“ *Cement and Concrete Research*, vol. 323, no. March 2022, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126545>.
16. V. N. Nerella and V. Mechtcherine, „Chapter 16 - Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D),“ *3D Concrete Printing Technology*, pp. 333–47, 2019, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6>.
17. S. Saunders, „Contour Crafting Will Develop Concrete 3D Printer for Disaster Relief, Thanks to DOD Contract,“ *3Dprint.com*, 17 August 2018, <https://3dprint.com/222125/contour-crafting-dod-contract/>.
18. E. Dini, „D-Shape Report,“ 6 April 2016.
19. CyBe „3D Concrete printers | CyBe.“ <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/printers/> (accessed March 20, 2023).
20. X. Zhang, M. Li, J. H. Lim, Y. Weng, Y. W. D. Tay, H. Pham and Q.- C. Pham, „Large-scale 3D printing by a team of mobile robots,“ *Automation in Construction*, vol. 95, pp 98-106, no. November 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.004>.
21. E. Ackermann „Mobile Robots Cooperate to 3D Print Large Structures,“ *IEEE Spectrum*, 28 August 2018, <https://spectrum.ieee.org/mobile-robots-cooperate-to-3d-print-structures>.
22. R. Jayathilakage, P. Rajeev and J. Sanjayan, „Rheometry for Concrete 3D Printing: A Review and an Experimental Comparison,“ *Smart Material and Smart Construction Technologies for Urban Development*, 8 August 2022, <https://doi.org/10.3390/buildings12081190>.
23. 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, p. 101833, November 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101833>.
24. G. H. Ahmed, „A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability,” *Journal of Building Engineering*, vol. 66, no. May 2023, p. 105863, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105863>.
25. M. Meurer and M. Classen, „Mechanical Properties of Hardened 3D Printed Concretes and Mortars- Development of a Consistent Experimental Characterization Strategy,” *ResearchGate*, no. 5 February 2021, <https://doi.org/10.3390/ma14040752>.
26. A. Aramburu, I. Calderon-Uriszar-Aldaca and I. Puente, „3D printing effect on the compressive strength of concrete structures,” *Construction and Building Materials*, vol 354, no. November 2022, p. 129108, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129108>.
27. J. G. Sanjayan, B. Nematollahi, M. Xia, and T. Marchment, “Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 172, no. May 2018, pp. 468–475, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232>.
28. J. Tammepärg, juhendaja M. Põldaru, „Erineva ristlõikega 3D prinditud betoonist konstruktsioonelementide kandevõime”.
29. T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, R. Law, A-. G. F. Gibb and T. Thorpe, „Hardened properties of high-performance printing concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. March 2012, pp. 558-566, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>.
30. M. van den Heever, A. du Plessis, J. Kruger and G. Van Zijl, „Evaluating the effects of porosity on the mechanical properties of extrusion-based 3D printed concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 153, no. March 2022, p. 106695, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106695>.
31. J. Kruger, A. du Plessis and G. Van Zijl, „An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete,” *Additive Manufacturing*, vol. 37, no. January 2021, p. 101740, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101740>.

32. E. Spurina, M. Sinka, K. Ziemelis and D. Bajare, „The effects of 3D printing on frost resistance of concrete,” *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2423/1/012037.
33. M. Nodehi, F. Aguayo, S. E. Nodehi, A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu and O. Gencel, „Durability properties of 3D printed concrete (3DPC),” vol. 142, no. October 2022, p. 104479, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104479>.
34. G. H. Ahmed, „A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability,” vol. 66, no. May 2023, p. 105863, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105863>.
35. M. Mohammad, E. Masad and S. G. Al-Ghamidi, „3D Concrete Printing Sustainability: A Comparative Life Cycle Assessment of Four Construction Method Scenarios,” December 2020, <https://doi.org/10.3390/buildings10120245>.
36. Keskkonnaproducti deklaratsioon, „Natural inert materials „Sand and Ggravel” Extracted from an artificial quarry basin,” *EPD Italy*, deklaratsiooni nr: 010/19-SVS-EPD01-Rev.2, 00001181.
37. Kunda Nordic Tsement AS, „Environmental product declaration,” *Kuna Nordic Tsement AS*, 2020, <https://www.kunda.heidelbergmaterials.ee/et/keskkonnadeklaratsioonid>.
38. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 933-1:2012 - Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod”.
39. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 933-2:2020 - Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 2: Terastikulise koostise määramine. Katsesõelad, avade nimimõõtmed”.
40. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „Mördi valmistamine toimus lähtudes standardist EVS-EN 196-1:2016 - Tsemendi katsetamine. Osa 1: Tugevuse määramine”.
41. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 1015-2:2004+A1:2007 - Müürimörtide katsemeetodid. Osa 2: Mördiproovide võtmine ja katsemörtide valmistamine”.

42. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 1015-3:2004+A2:2007 Mürimörtide katsemeetodid. Osa 3: Mordisegu konsistentsi määramine (raputuslaual)“.
43. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 12390-7:2019 – Kivistunud betooni katsetamine. Osa 7: Kivistunud betooni tihedus“.
44. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 12390-1:2021 – Kivistunud betooni katsetamine. Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded“.
45. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, „EVS-EN 1015-11:2019 - Mürimörtide katsemeetodid. Osa 11: Kivistunud mördi painde-ja survetugevuse määramine“.

LISAD

Lisa 1 kg CO₂e arvutus

Segu nr	Kood	Kvartslüiva % segaliivast	Klaasliiva % segaliivast	Tsemendi % kuivsegust	Mass [kg]			klaasliiva mõju [kg CO ₂ e]	kvartslüiva mõju [kg CO ₂ e]	tsemendi mõju [kg CO ₂ e]	Kokku [kg CO ₂ e]
					Klaasliiv	Kvartslüiv	Tsement				
1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	100	0	25%	0	1095	360	-	24,473	290,88	3,15E+02
2	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	87,5	12,5	25%	23,625	960	360	0,091	21,456		3,12E+02
3	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	75	25	25%	46,875	825	360	0,181	18,439		3,09E+02
4	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	62,5	37,5	25%	70,5	690	360	0,272	15,422		3,07E+02
5	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	50	50	25%	93,75	555	360	0,361	12,404		3,04E+02
6	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	81,2	18,8	25%	30,75	892,11	360	0,119	19,939		3,11E+02
7	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	62,5	37,5	25%	61,125	689,22	360	0,236	15,404		3,07E+02
8	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	43,7	56,3	25%	91,5	484,14	360	0,353	10,821		3,02E+02
9	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	33,3	66,7	25%	106,13	369,63	360	0,409	8,261		3,00E+02
10	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	87,5	12,5	25%	25,313	956,25	360	0,098	21,372		3,12E+02
11	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	75	25	25%	50,625	817,5	360	0,195	18,271		3,09E+02
12	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	62,5	37,5	25%	75,938	678,75	360	0,293	15,170		3,06E+02
13	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	50	50	25%	101,25	540	360	0,390	12,069		3,03E+02
14	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	87,5	12,5	25%	21,563	960	360	0,083	21,456		3,12E+02
15	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	75	25	25%	43,125	825	360	0,166	18,439		3,09E+02
16	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK	62,5	37,5	25%	64,688	690	360	0,249	15,422		3,07E+02
17	50PL-0KL-0PK-50KK-0JK	50	50	25%	86,25	555	360	0,332	12,404		3,04E+02

Lisa 2 Esialgne katseplan

Segu nr	Segu komponendid						Katsed														
	Kunda tsement CEM II(A-M) 42,5 R	Peen-liiv	Kesk-liiv	Peen klaas	Kesk klaas	Jäme klaas	MÄRKUSED	Kitilabori katsed						Segu printimine							
								Liiva terastikuline koostis	Liiva puistetiheus	Veevajadus	Töödeldavuse kadu	Survetugevus 40x40x160 mm	Paindetugevus 40x40x160 mm	Mördi tiheus	kivistunud tiheus	Prinditud sektsiooni tiheus (kaalumine vees)	Prinditud kihtide nake (toosifreesiga puuritud)	Survetugevus 40x40x160 mm	Survetugevus (lõigatud 40x40x160 mm)	Prinditud kihtide kjuhoidvus (printimiskõrgus)	
	suurus, mis andis vaadeldava koostisosa mõju uurides soovitud						Materjali kogus (miinimum; ei arvasta)	1 L liiva		2 L kuivsegu		1,5 L kuivsegu				75 L mörti					
1	etalon	50%	50%	0%	0%	0%		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
2	etalon	50,0%	37,5%	6,3%	6,3%	0,0%		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
3	etalon		25,0%	12,5%	12,5%	0,0%		x	x	x	x	xx	x	x							
4	etalon		12,5%	18,8%	18,8%	0,0%		x	x	x	x	x	x	x							
5	etalon		0,0%	25,0%	25,0%	0,0%		x	x	x	x	x	x	x							
6	etalon		46,9%	34,4%	3,2%	3,2%	12,5%		x	x	x	x	x	x							
7	etalon	43,8%	18,8%	6,3%	6,3%	25,0%		x	x	x	x	x	x								
8	etalon	40,6%	3,1%	9,4%	9,4%	37,5%		x	x	x	x	x	x								
9	etalon	33,3%	0,0%	8,3%	8,3%	50,0%		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
10	etalon	37,5%	50,0%	12,5%	0,0%	0,0%		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
11	etalon	25,0%		25,0%				x	x	x	x	x	xx	x	x						
12	etalon	12,5%		37,5%				x	x	x	x	x	x	x	x						
13	etalon	0,0%		50,0%				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
14	etalon	10000,0%	100,0%		0,0%			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
14	etalon	50,0%	37,5%	0,0%	12,5%	0,0%		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
15	etalon		25,0%				25,0%		x	x	x	x	x	x	x	x					
16	etalon		12,5%				37,5%		x	x	x	x	x	x	x	x					
17	etalon		0,0%				50,0%		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Lisa 3 Klaas- ja kvartslüiva terastikulise koostise

Sõela ava [23]	PEENLIIV				KESKLIIV			
	Jääk sõelal [3]	Osa- jääk sõelal	Kogu- jääk sõelal	Läbind [%]	Jääk sõelal [3]	Osa- jääk sõelal	Kogu- jääk sõelal	Läbind [%]
4	0,00	0,0	0,0	100,0	0,00	0,0	0,0	100,0
2	0,00	0,0	0,0	100,0	0,00	0,0	0,0	100,0
1	0,00	0,0	0,0	100,0	36,70	18,4	18,4	81,7
0,5	18,50	9,3	9,3	90,8	151,00	75,5	93,9	6,2
0,25	54,10	27,1	36,3	63,7	11,20	5,6	99,5	0,6
0,125	91,90	46,0	82,3	17,8	0,90	0,5	99,9	0,1
<0,125	35,10	17,6	100,0	0,0	0,10	0,1	100,0	0,1

Sõela ava [23]	PEENKLAAS				KESKKLAAS			
	Jääk sõelal [3]	Osa- jääk sõelal	Kogu- jääk sõelal	Läbind [%]	Jääk sõelal [3]	Osa- jääk sõelal	Kogu- jääk sõelal	Läbind [%]
4	0,00	0,0	0,0	100,0	0,00	0,0	0,0	100,0
2	0,00	0,0	0,0	100,0	0,30	0,2	0,2	99,9
1	0,20	0,1	0,1	99,9	47,30	23,7	23,8	76,2
0,5	47,30	23,7	23,8	76,3	2,00	1,0	24,8	75,2
0,25	2,00	1,0	24,8	75,3	0,03	0,0	24,8	75,2
0,125	0,00	0,0	24,8	75,3	0,01	0,0	24,8	75,2
<0,125	0,00	0,0	24,8	75,3	0,01	0,0	24,8	75,2

Sõela ava [23]	JÄMEKLAAS		
	Osa- jääk sõelal	Kogu- jääk sõelal	Läbind [%]
4	0,1	0,1	99,9
2	23,2	23,3	76,8
1	1,4	24,6	75,4
0,5	0,0	24,6	75,4
0,25	0,1	24,7	75,3
0,125	0,1	24,8	75,2
<0,125	0,1	24,8	75,2

Lisa 4 Veevajaduse määramise tulemused

Segu nr:	Segu kood:	VT	d ₁ [23]	d ₂ [23]	d _{kesk} [23]
1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	0,58	146	151	148,5
2	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	0,55	148	146	147
3	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	0,56	149	154	151,5
4	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	0,56	156	148	152
5	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	0,57	154	155	154,5
6	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	0,55	156	153	154,5
7	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	0,52	150	148	149
8	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	0,5	146	144	145
9	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	0,48	148	150	149
10	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	0,55	145	146	145,5
11	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	0,56	150	152	151
12	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	0,58	145	151	148
13	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	0,64	154	147	150,5
14	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	0,54	152	149	150,5
15	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	0,54	151	145	148
16	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK	0,51	151	147	149
17	50PL-0KL-0PK-50KK-0JK	0,51	144	146	145

Lisa 5 Konsistentsi kao määramise katsetulemused

		konsistentsi kadu d_{kesk} [mm]																													
		SEGU NR																													
		1			2			3			4			5			6			7			8			9			10		
Aeg [min]		50PL-50KL-OPK-OKK-0JK			50PL-50KL-OPK-OKK-0JK			50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK			50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK			50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK			50PL-0KL-25PK-25KK-0JK			46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK			43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK			40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK			33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK		
		d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}
10	156	152	154	151	152	151,5	152	149	150,5	150	146	148	146	150	148	154	153	153,5	149	146	147,5	145	145	145	145	146	145,5	146	147	146,5	
20	151	143	147	136	134	135	153	151	152	138	136	137	134	134	134	145	145	145	141	141	141	145	143	144	138	136	137	144	147	145,5	
30	132	129	130,5	132	126	129	140	141	140,5	136	135	135,5	132	132	132	145	144	144,5	137	135	136	132	133	132,5	131	130	130,5	141	141	141	
40	129	126	127,5	129	129	129	139	143	141	135	133	134	132	132	132	145	141	143	137	139	138	125	130	127,5	129	127	128	138	133	135,5	
50	126	124	125	126	129	127,5	144	144	144	132	136	134	132	137	134,5	135	137	136	136	135	135,5	131	126	128,5	130	128	129	135	140	137,5	
60	127	121	124				136	137	136,5				132	129	130,5	140	134	137	136	133	134,5	124	124	124	125	127	126	126	127	126,5	
70	126	122	124				128	128	128				132	129	130,5	139	134	136,5				128	125	126,5	128	128	128	126	126	126	
80							128	131	129,5																						

		konsistentsi kadu d_{kesk} [mm]																				
		SEGU NR																				
		11			12			13			14			15			16			17		
Aeg [min]		37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK			25PL-50KL-25PK-0KK-0JK			12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK			0PL-50KL-50PK-0KK-0JK			50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK			50PL-25KL-0PK-25KK-0JK			50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK		
		d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}	d ₁	d ₂	d _{kesk}
10	149	147	148	151	145	148	145	145	145	149	145	147	147	154	150,5	154	153	153,5	153	151	152	
20	136	136	136	137	137	137	134	132	133	138	138	138	135	134	134,5	142	139	140,5	149	144	146,5	
30	132	130	131	137	133	135	132	129	130,5	130	128	129	132	138	135	139	138	138,5	144	140	142	
40	128	124	126	133	132	132,5	129	122	125,5	132	132	132	132	132	132	140	138	139	143	135	139	
50	127	128	127,5	124	126	125	123	123	123	133	131	132	134	132	133	140	137	138,5	134	135	134,5	
60	125	123	124	134	127	130,5	123	121	122	131	131	131							134	129	131,5	
70	127	126	126,5	127	128	127,5													134	129	131,5	
80				123	120	121,5																

Lisa 6 7 päevaste katsekehade tulemused

segu nr	katsekeha nr	KOOD	massid [g]					Ruumalad [cm ³]		Tihedused [kg/m ³]			Purustav jõud [kN]			Survetugevus [N/mm ²]
			m _{vorm,tühi}	m _{vorm,täis}	m _{mört}	m _{vees}	m _{õhus}	V _{märg}	V _{vorm}	ρ _{mört}	ρ _{märg}	ρ _{märg,kesk}	F ₁	F ₂	F _{kesk}	
1	1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	7 272	8 978	1 706	308	563,4	256	773	2206,0	2200,3	2200,6	49	53	52,3	32,7
	2					314,2	575	261					53	54		
	3					307,8	563,4	256					52	53		
2	1	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	7 102	8 710	1 608	276,6	529,2	253	769	2092,3	2089,3	2090,7	48	49	50,7	31,7
	2					276	528,4	253					52	53		
	3					287,2	549,2	263					53	49		
3	1	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	17 987	19 536	1 549	257	520	264	791	1957,8	1954,4	1963,7	42	43	42,0	26,3
	2					253,2	517,4	265					42	41		
	3					253,8	516,2	263					43	41		
4	1	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	18 586	20 000	1 414	221,6	483	262	782	1808,3	1816,6	1828,2	43	43	41,2	25,7
	2					215,4	478	263					42	42		
	3					212,2	468,6	257					40	37		
5	1	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	17 933	19 250	1 317	184,6	448,2	264	784	1680,3	1693,8	1698,0	39	39	34,5	21,6
	2					181	440,6	260					30	32		
	3					183	442	260					33	34		
6	1	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	17 950	19 544	1 594	264,6	524,6	261	792	2013,2	1996,0	2008,9	41	45	43,8	27,4
	2					264,8	529,6	265					42	44		
	3					271	536,4	266					47	44		
7	1	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	17 981	19 394	1 413	217	473,6	257	767	1841,4	1857,1	1856,5	43	39	40,3	25,2
	2					216,4	467,8	252					43	37		
	3					225,4	483,2	258					40	40		

segu nr	katsekeha nr	KOOD	massid [g]					Ruumalad [cm ³]		Tihedused [kg/m ³]			Purustav jõud [kN]			Survetugevus [N/mm ²]	
			m _{vorm,tühi}	m _{vorm,täis}	m _{mört}	m _{vees}	m _{õhus}	V _{märg}	V _{vorm}	ρ _{mört}	ρ _{märg}	ρ _{märg,kesk}	F ₁	F ₂	F _{kesk}		
8	1	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	17 979	19 270	1 291	172,4	438	266	784	1646,3	1645,8	1659,0	1666,7	36	38	39,0	24,4
	2					171,4	430,2	259						41	35		
	3					180,4	438,6	259						42	42		
9	1	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	17 863	19 042	1 179	138,8	403,2	265	787	1498,1	1521,9	1507,0	1512,3	39	39	35,8	22,4
	2					132	390,8	259						32	33		
	3					134	396,2	263						35	37		
10	1	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	17 926	19 580	1 654	288,4	553	265	793	2085,3	2085,8	2072,8	2079,4	55	49	50,3	31,5
	2					282,6	545	263						49	48		
	3					286,8	551,4	265						55	46		
11	1	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	17 977	19 487	1 510	244,6	500,8	257	777	1943,0	1950,8	1943,8	1947,9	43	44	43,0	26,9
	2					246,2	506	260						42	43		
	3					247,4	507	260						44	42		
12	1	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	6 936	8 340	1 404	207,6	468,6	262	782	1794,6	1791,8	1789,8	1790,0	40	40	38,4	24,0
	2					207,4	468,8	262						37	38		
	3					204,6	463	259						38	38		
13	1	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	7 218	8 462	1 244	163,8	419,2	256	769	1618,7	1638,1	1635,1	1634,8	32	30	29,3	18,3
	2					162,4	416,8	255						31	27		
	3					163,2	420,4	258						28	28		
14	1	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	7 056	8 694	1 638	289,6	550,2	261	776	2109,9	2107,1	2103,1	2108,4	58	63	58,8	36,8
	2					288,8	549,6	261						55	60		
	3					283,6	537	254						58	59		

segu nr	katsekeha nr	KOOD	massid [g]					Ruumalad [cm ³]		Tihedused [kg/m ³]			Purustav jõud [kN]			Survetugevus [N/mm ²]
			m _{vorm,tühi}	m _{vorm,täis}	m _{mört}	m _{vees}	m _{õhus}	V _{märg}	V _{vorm}	ρ _{mört}	ρ _{märg}	ρ _{märg,kesk}	F ₁	F ₂	F _{kesk}	
15	1	50PL-25KL-OPK-25KK-0JK	6 694	8 186	1 492	246,4	498,6	253	763	1955,6	1973,0	1968,4	50	50	49,2	30,7
	2					242,8	495,2	253			1958,0		49	49		
	3					251,2	508	257			1974,2		47	50		
16	1	50PL-12,5KL-OPK-37,5KK-0JK	7 260	8 698	1 438	228,6	486,6	259	768	1872,1	1882,3	1885,6	48	48	47,2	29,5
	2					223,8	477,4	254			1878,7		45	48		
	3					229,4	484,4	256			1895,8		46	48		
17	1	50PL-0KL-OPK-50KK-0JK	7 500	8 838	1 338	194,4	455,8	262	780	1714,6	1740,2	1733,5	44	44	43,4	27,1
	2					187	442,6	256			1728,1		43	44		
	3					192,6	454,4	262			1732,2		43	43		

Lisa 7 21 päeva vanuste katsekehade tulemused

segu nr	katsekeha nr	KOOD	mõõtmed [mm]															Tihedused [kg/m ³]			Purustav paindejõud [kN] F _f	Paindejõud [Mpa]			Purustav survejõud [kN]		Survetugevus [Mpa]		
			a ₁	a _{kesk,1}	a ₂	a _{kesk,2}	b ₁	b _{kesk,1}	b ₂	b _{kesk,2}	h ₁	h _{kesk,1}	h ₂	h _{kesk,2}	a _{kesk}	b _{kesk}	h _{kesk}	ρ _{mört}	ρ _{21p}	ρ _{21p,kesk}		R _f	R _{f,kesk}	F _{c,1}	F _{c,2}	R _{c,1}	R _{c,2}	R _{c,kesk}	
1	1	50PL-50KL-0PK-0KK-0JK	39,4		40,2		40,9		40,2		162		161,7																
			39,3	39,5	40,4	40,4	40,9	40,5	40,1	40,2	161,3	161,5	161,8	161,7	40	40,4	162		2116,7		2,35	5,5		72	73	45,00	45,63		
			39,7		40,5		39,7		40,4		161,1		161,6																
	2		39,9	39,9	39,7	39,5	39,3	41		40,5		160,9		161,4															
				39,9	39,7	39,5	39,3	40,8	40,9	40,3	40,7	161	160,8	161,5	161,5	39,5	40,8	161		2088,5	2098,0	2,45	5,7	5,7	75	74	46,88	46,25	46,7
				39,4		39,2		40,8		41,2		160,4		161,7															
	3		41,9	41,9		40,2		40,9		40,5		160,4		161,3															
				41,6	41,7	40,3	40,1	40,8	40,8	40,3	40,4	160,1	160,3	161	161,2	40,9	40,6	161		2088,9		2,5	5,9		80	74	50,00	46,25	
				41,6		39,9		40,7		40,4		160,5		161,4															
2	1	50PL-37,5KL-6,3PK-6,3KK-0JK	40,8		39,7		40,3		40,4		160		160,3																
			40,8	40,8	39,7	39,7	40	40,1	40,4	40,4	160	160	160,3	160,3	40,3	40,3	160		2036,6		2,4	5,6		75	73	46,88	45,63		
			40,8		39,7		40		40,3		160		160,3																
	2		40,2	40,2	40,2	39,6	39,6	40,6		41,3		160		159,9															
				40,1	40,2	39,7	40,6	40,6	40,6	41,6	41,5	160,1	160,1	160	159,9	39,9	41,1	160		2076,8	2015,5	2,1	4,9	5,4	77	75	48,13	46,88	46,6
				40,2		39,5		40,5		41,5		160,2		159,9															
	3		39,8	39,8	39,8	39,3	39,3	39,9		40,5		160,2		160,6															
				39,9	39,8	39,3	39,3	40	40	40,6	40,6	160,1	160,1	160,7	160,7	39,6	40,3	160		2028,5		2,4	5,6		76	71	47,50	44,38	
				39,7		39,3		40,1		40,6		159,9		160,7															
3	1	50PL-25KL-12,5PK-12,5KK-0JK	40,2		40		40		39,9		160,4		160,6																
			41,6	40,8	40,2	40,2	39,7	39,8	39,5	39,7	161,2	160,7	160,7	160,6	40,5	39,8	161		1914,7		2	4,7		58	56	36,25	35,00		
			40,6		40,4		39,6		39,8		160,5		160,6																
	2		39,9	39,9	40,4	40	39,5	40,6		40,4		160,8		160,6															
				40,7	40,4	39,2	40,3	40,3	40,5	40,6	40,5	160,7	160,7	160,5	160,5	40	40,5	161		1957,7	1918,1	1,75	4,1	4,6	60	59	37,50	36,88	36,7
				40,6		39,4		40,5		40,6		160,6		160,5															
	3		40,3	40,3	40,3	40,4	40,7	40,1		41,1		160,5		160,5															
				40,4	40,3	40,7	40,7	39,8	39,9	41,7	41,3	160,8	160,6	160,6	160,6	40,5	40,6	161		1907,8		2,1	4,9		60	59	37,50	36,88	
				40,2		41		39,8		41		160,6		160,7															
4	1	50PL-12,5KL-18,8PK-18,8KK-0JK	40,3		40,7		40		39,6		160,7		161,3																
			40,7	40,6	40,8	40,7	40,1	40,2	40,5	40,2	161	161	161,2	161,1	40,7	40,2	161		1814,0		2	4,7		56	58	35,00	36,25		
			40,8		40,7		40,4		40,4		161,2		160,9																
	2		39,9	39,9	39,9	40,4	40,3	40,8		42,8		161,9		161,9															
				39,8	39,9	40,2	40,3	40,7	40,8	41,5	42,1	161,5	161,6	162,2	162	40,1	41,5	162		1878,6	1830,2	1,9	4,5	4,4	56	56	35,00	35,00	35,2
				40		40,3		40,8		42		161,5		162															
	3		40,2	40,2	40,6	40,6	40,6	39,2		161,7		161,7		161,2															
				40,4	40,6	41	40,7	40,7	40,7	39,3	39,2	161,5	161,5	161,3	161,3	40,7	40	161		1829,0		1,75	4,1		59	53	36,88	33,13	
				41,2		40,6		40,9		39,1		161,3		161,5															
5	1	50PL-0KL-25PK-25KK-0JK	40,6		41		40,4		40,4		161		160,5																
			41	41	40,8	41,3	40,3	40,3	40,6	40,5	160,2	160,7	160,3	160,4	41,2	40,4	161		1657,5		1,6	3,8		-	47	-	29,38		
			41,3		42		40,1		40,5		160,9		160,3																
	2		40,3	40,3	40,4	40	40,1	40,8		40		160,4		160															
				40,3	40,4	40	40,1	41	40,9	40	40,1	160,4	160,4	160	160	40,3	40,5	160		1652,7	1656,4	1,65	3,9	3,8	51	51	31,88	31,88	32,0
				40,5		40,2		40,9		40,2		160,5		159,9															
	3		40,3	40,3	40,4	40,2	40,3	40,3		40,6		160,2		159,9															
				40,4	40,4	40,3	40,3	40,4	40,4	41	40,8	160,3	160,2	160	159,9	40,4	40,6	160		1659,1		1,65	3,9		55	52	34,38	32,50	
				40,5		40,3		40,5		40,8		160		159,8															

segu nr	katsekeha nr	KOOD	mõõtmed [mm]															Tihedused [kg/m ³]			Purustav paindejõud [kN]	Paindejõud [Mpa]			Purustav survejõud [kN]		Survetugevus [Mpa]				
			a ₁	a _{kesk,1}	a ₂	a _{kesk,2}	b ₁	b _{kesk,1}	b ₂	b _{kesk,2}	h ₁	h _{kesk,1}	h ₂	h _{kesk,2}	a _{kesk}	b _{kesk}	h _{kesk}	ρ _{mört}	ρ _{21p}	ρ _{21p,kesk}	F _f	R _f	R _{f,kesk}	F _{c,1}	F _{c,2}	R _{c,1}	R _{c,2}	R _{c,kesk}			
6	1	46,9PL-34,4KL-3,2PK-3,2KK-12,5JK	40,4		39,8		39,9		40,9		161,2		160,9																		
			40,5	40,5	39,9	39,9	40,8	40,4	41	40,9	160,9	161	161,1	161,1	40,2	40,7	161		1940,1		2,35	5,5		59	60	36,88	37,50				
			40,5		39,9		40,5		40,8		160,8		161,4																		
	2		41		39,2		41,2		41,5		161,2		160,7																		
			40,6	40,9	39,8	39,6	41,6	41,4	41,8	41,6	161	161,1	161	161	40,3	41,5	161	1996,3	1927,8	1942,2	2,4	5,6	5,4	63	60	39,38	37,50	38,1			
			41		39,9		41,3		41,5		161,1		161,2																		
	3		41,2		41,4		40,3		40,7		161,3		161,5																		
			41,8	41,2	41,6	41,5	40,6	40,2	40,6	41,1	161,5	161,4	161,4	161,4	41,4	40,7	161		1958,8		2,1	4,9		64	60	40,00	37,50				
			40,7		41,6		39,7		42		161,5		161,2																		
7	1	43,8PL-18,8KL-6,3PK-6,3KK-25JK	40,6		40,7		40,2		39,6		160,7		159,9																		
			40,8	40,7	40,8	40,7	40,2	40,1	39,9	39,7	160,5	160,4	160,1	160,1	40,7	39,9	160		1826,8		2	4,7		59	56	36,88	35,00				
			40,7		40,6		40		39,7		160,1		160,3																		
	2		41		39,9		40,5		40,4		160		160,6																		
			41,2	41	40,3	40,3	41	41,2	40,4	40,4	160,2	160,4	160,2	160,3	40,7	40,8	160	1859,8	1789,9	1808,8	2,15	5,0	4,7	57	56	35,63	35,00	35,0			
			40,9		40,8		42		40,4		161,1		160																		
	3		40		40,4		41,1		40,2		160		160,4																		
			39,9	39,8	40,3	40,3	41,3	41,1	39,9	39,9	160,1	160,2	160,4	160,3	40,1	40,5	160		1809,7		1,9	4,5		52	56	32,50	35,00				
			39,5		40,2		40,9		39,7		160,6		160,2																		
8	1	40,6PL-3,1KL-9,4PK-9,4KK-37,5JK	40,5		40,9		40,6		40,6		160		160,2																		
			40,7	40,6	41,1	41	41	40,7	40,5	40,6	160,3	160,2	160	160	40,8	40,7	160		1643,5		1,7	4,0		54	55	33,75	34,38				
			40,6		41,1		40,5		40,6		160,4		159,9																		
	2		40,4		40,1		40,8		40,6		160		160,2																		
			40,2	40,3	40,7	40,6	40,8	40,8	40,5	40,5	159,8	159,8	160,5	160,4	40,5	40,7	160	1673,8	1590,9	1639,2	2,1	4,9	4,7	51	50	31,88	31,25	33,2			
			40,2		41		40,7		40,4		159,7		160,5																		
	3		40,4		40,3		40,6		41,3		159,7		160,2																		
			40,6	40,6	40,3	40,3	41	40,8	40,9	41	159,8	159,8	160,1	160,1	40,5	40,9	160		1683,2		2,2	5,2		54	55	33,75	34,38				
			40,9		40,3		40,8		40,7		159,9		159,9																		
9	1	33,3PL-0KL-8,3PK-8,3KK-50JK	40,9		41		40,9		40,6		161,4		161,2																		
			40,5	40,9	41,5	41,4	41	40,8	40,6	40,6	161,3	161,3	161,1	161,2	41,2	40,7	161		1470,0		1,85	4,3		45	45	28,13	28,13				
			41,2		41,7		40,6		40,5		161,3		161,3																		
	2		39,4		40,2		40,9		40,7		161		160,8																		
			39,2	39,3	40,8	40,4	41,2	40,9	40,4	40,6	160,9	160,9	160,8	160,8	39,9	40,8	161	1521,3	1466,3	1472,6	2,05	4,8	4,5	48	47	30,00	29,38	29,4			
			39,2		40,3		40,6		40,6		160,9		160,9																		
	3		40,2		39,5		42		40,5		160,8		160,8																		
			40,4	40,3	39,2	39,3	39,8	40,8	40,5	40,5	160,8	160,7	161	160,9	39,8	40,7	161		1481,4		1,85	4,3		47	50	29,38	31,25				
			40,2		39,3		40,6		40,6		160,6		160,9																		
10	1	37,5PL-50KL-12,5PK-0KK-0JK	39,9		39,6		40,2		40,8		160,1		160,3																		
			39,7	39,8	39,8	39,7	39,9	40,1	40,6	40,7	160,1	160,2	160,2	160,2	39,8	40,4	160		2027,5		2,45	5,7		69	74	43,13	46,25				
			39,7		39,7		40,1		40,6		160,4		160,2																		
	2		39,6		39,2		40,1		40,6		160,2		160,1																		
			39,9	39,8	39,5	39,4	40,6	40,5	40,9	40,7	160,2	160,2	160	160,1	39,6	40,6	160	2101,5	2033,5	2030,3	2,2	5,2	5,4	65	69	40,63	43,13	43,3			
			40		39,6		40,8		40,6		160,2		160,1																		
	3		39,4		39,5		40,5		39,9		160,1		160																		
			39,4	39,4	39,9	39,8	40,7	40,6	39,8	39,9	160,1	160,1	160,1	160,1	39,6	40,3	160		2029,9		2,25	5,3		70	69	43,75	43,13				
			39,3		40,1		40,5		39,9		160		160,2																		
11	1	25PL-50KL-25PK-0KK-0JK	39,9		38,8		41		39,9		161		160																		
			40	39,8	39,3	39,3	41,1	41,1	40	39,9	161,2	161	160,1	160,1	39,6	40,5	161		1875,1		2,25	5,3		62	61	38,75	38,13				
			39,5		39,7		41,1		39,9		160,7		160,3																		
	2		40,6		40,8		41,1		39,9		159,9		159,9																		
			40,6	40,6	40,8	40,8	41,1	41	40,1	40,1	160	159,9	160	159,9	40,7	40,6	160	1940,6	1881,8	1878,8	2	4,7	5,2	62	63	38,75	39,38	38,3			
			40,5		40,7		40,9		40,2		159,9		159,8																		
	3		39		39,8		40,9		40,2		160,1		160,4																		
			38,9	38,9	39,8	39,8	41,3	41,1	40,3	40,1	159,9	160	160,4	160,5	39,4	40,6	160		1879,6		2,35	5,5		59	61	36,88	38,13				
			38,8		39,8		41		39,9		160		160,6																		

segu nr	katsekeha nr	KOOD	mõõtmed [mm]															Tihedused [kg/m³]			Purustav paindejõud [kN]		Paindejõud [Mpa]			Purustav survejõud [kN]		Survetugevus [Mpa]				
			a ₁	a _{kesk,1}	a ₂	a _{kesk,2}	b ₁	b _{kesk,1}	b ₂	b _{kesk,2}	h ₁	h _{kesk,1}	h ₂	h _{kesk,2}	a _{kesk}	b _{kesk}	h _{kesk}	ρ _{mört}	ρ _{21p}	ρ _{21p,kesk}	F _f	R _f	R _{f,kesk}	F _{c,1}	F _{c,2}	R _{c,1}	R _{c,2}	R _{c,kesk}				
12	1	12,5PL-50KL-37,5PK-0KK-0JK	40,3		40		40,5		39,9		161		160,5																			
			40,2	40,2	40,1	40	40,4	40,4	40	40	160,9	160,9	160,6	160,6	40,1	40,2	161		1727,3		1,9	4,5		47	41	29,38	25,63					
			40,1		39,9		40,2		40,2		160,8		160,7																			
	2		40,9		39,9		40,3		39,9		160,6		160,5																			
			40,9	41	40	40	40,2	40,2	40	39,9	160,7	160,6	160,3	160,4	40,5	40,1	161	1783,6	1724,7	1725,5	1,7	4,0	4,1	49	48	30,63	30,00	29,2				
			41,1		40,2		40,2		39,9		160,5		160,4																			
	3		40		39,7		40,2		40,3		160,6		160,7																			
			40,1	40,1	39,8	39,8	40,3	40,2	39,9	40,1	160,5	160,5	160,7	160,7	40	40,2	161		1724,4		1,6	3,8		49	46	30,63	28,75					
			40,1		39,9		40,2		40		160,4		160,8																			
13	1	0PL-50KL-50PK-0KK-0JK	40,4		40,6		40,4		41,2		160,7		160,2																			
			40,2	40,2	40,6	40,5	40,1	40,2	41,1	41,1	160,8	160,7	160,4	160,4	40,4	40,7	161		1537,2		1,3	3,0		36	35	22,50	21,88					
			40		40,4		40		40,9		160,5		160,5																			
	2		40,1		40		39,7		40,4		160,5		160,3																			
			40,1	40,2	39,9	40,1	39,7	39,7	40,3	40,3	160,4	160,3	160,5	160,4	40,2	40	160	1596,6	1529,2	1532,7	1,5	3,5	3,3	36	36	22,50	22,50	23,0				
			40,3		40,3		39,8		40,3		160		160,4																			
	3		40,3		40,7		41,3		40,5		160,5		160,8																			
			40	40,2	40,7	40,7	41,2	41,2	40,4	40,3	160,5	160,4	160,7	160,6	40,5	40,8	161		1531,6		1,45	3,4		39	39	24,38	24,38					
			40,2		40,8		41		40,1		160,2		160,4																			
14	1	50PL-37,5KL-0PK-12,5KK-0JK	41,1		41,2		41		41,2		160		159,7																			
			41,2	41,1	41,3	41,2	41	41	41,3	41,3	160,1	160	160,1	159,8	41,2	41,2	160		2025,4		2,4	5,6		71	70	44,38	43,75					
			40,9		41		40,9		41,4		159,9		159,7																			
	2		40,9		39,6		41,4		41		159,7		160,4																			
			40,8	40,9	39,8	39,8	41,3	41,3	41,2	41,1	159,9	159,8	159,6	159,9	40,4	41,2	160	2077,5	2018,5	2030,9	2,5	5,9	5,5	71	73	44,38	45,63	44,5				
			40,9		39,9		41,1		41		159,9		159,6																			
	3		40,7		40,8		41,1		40,7		159,6		159,9																			
			40,5	40,5	40,4	40,4	41	41	40,8	40,7	159,8	159,7	159,8	159,8	40,5	40,9	160		2048,7		2,15	5,0		72	70	45,00	43,75					
			40,3		40,1		40,9		40,5		159,8		159,8																			
15	1	50PL-25KL-0PK-25KK-0JK	40,1		41,1		40,5		41,2		160,9		160,7																			
			40,3	40,4	41,3	41,4	40,6	40,5	41,2	41,1	160,7	160,8	160,5	160,6	40,9	40,8	161		1933,9		2,25	5,3		71	69	44,38	43,13					
			40,8		41,7		40,4		40,9		160,8		160,6																			
	2		39,7		41,4		40,6		40,4		160,3		160,6																			
			39,5	39,5	41,5	41,4	40,8	40,6	40,3	40,3	160,2	160,3	160,2	160,3	40,5	40,5	160	1976,8	1925,4	1934,4	2,3	5,4	5,3	70	72	43,75	45,00	44,3				
			39,4		41,3		40,5		40,1		160,3		160,2																			
	3		39,6		40,4		40,5		41,4		159,9		160,2																			
			39,6	39,6	40,3	40,4	40,4	40,4	41,4	41,4	159,9	159,9	160,2	160,2	40	40,9	160		1943,8		2,25	5,3		71	72	44,38	45,00					
			39,5		40,4		40,2		41,3		160		160																			
16	1	50PL-12,5KL-0PK-37,5KK-0JK	39,5		39,8		41		41,6		160,3		159,9																			
			39,6	39,7	40,1	40,1	40,9	40,9	41,5	41,5	160,1	160,2	160,2	160,2	39,9	41,2	160		1816,6		-	-		59	59	36,88	36,88					
			40		40,3		40,8		41,4		160,2		160,5																			
	2		40		40,8		41,2		41,5		160,1		160,4																			
			39,9	40	40,7	40,8	41,3	41,2	41,8	41,7	160,2	160,3	160,3	160,3	40,4	41,5	160	1859,9	1797,8	1809,9	2	4,7	4,8	56,5	52	35,31	32,50	35,9				
			40		40,8		41,2		41,7		160,5		160,1																			
	3		40,9		40,9		41		41,4		160,3		161,2																			
			40,3	40,4	40,5	40,5	41	41	41,6	41,4	160,5	160,5	160,7	160,8	40,5	41,2	161		1815,3		2,1	4,9		57	61	35,63	38,13					
			40,1		40,2		40,9		41,3		160,8		160,6																			
17	1	50PL-0KL-0PK-50KK-0JK	40,1		40,6		40,2		41,2		160,5		160,1																			
			40,4	40,3	40,4	40,4	40,2	40,2	41,6	41,3	160,5	160,5	160	159,9	40,4	40,8	160		1644,6		1,9	4,5		52	53	32,50	33,13					
			40,4		40,2		40,2		41,2		160,6		159,6																			
	2		40,5		39,8		41,5		41,2		159,7		160,2																			
			40	40,1	39,9	39,9	41,6	41,6	41,6	41,2	159,9	159,9	159,8	159,9	40	41,4	160	1706,6	1667,7	1656,2	1,75	4,1	4,0	53		33,13	0,00	27,4				
			39,9		40,1		41,6		40,8		160,2		159,7																			
	3		41,9		41,7		40,6		40,4		160,5		159,8																			
			42,1	41,8	41,9	41,6	40,9	40,8	40,2	40,2	160,2	160,2	160,1	160,1	41,7	40,5	160		1656,4		1,5	3,5		54	51	33,75	31,88					
			41,5		41,2		41		40		159,9		160,3																			