



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**PURUSTATUD SILIKAATKIVIST
TÄITEMATERJALI KASUTAMINE PÕLETATUD
PÕLEVKIVI SIDEAINENA 3D PRINDITAVAS
BETOONIS**

**CRUSHED SILICATE ROCK AS AN AGGREGATE
AND GROUND BURNT OIL SHALE AS BINDER IN
3D PRINTABLE CONCRETE**
MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Toomas Erik Uus

Üliõpilaskood: 182347EAEI

Juhendaja: Mattias Põldaru,
doktorant-nooremteadur

Tallinn 2024

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.

“.....” mai 2024

Autor: Toomas Erik Uus

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” mai 2024

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

1. Mina, Toomas Erik Uus

2. annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
PURUSTATUD SILIKAATKIVIST TÄITEMATERJALI KASUTAMINE
PÕLETATUD PÕLEVKIVI SIDEAINEGA 3D PRINDITAVAS BETOONIS,

mille juhendaja on Mattias Põldaru,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13.05.2024 (kuupäev)

EHITUSE JA ARHITEKTUURI INSTITUUT
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Toomas Erik Uus, 182347EAEI

Õppekava, peeriala: EAEI02/17 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine,
spetsialiseerumine: projekteerimine

Juhendaja: Mattias Põldaru, doktorant-nooremteadur

Konsultant: -

Lõputöö teema:

PURUSTATUD SILIKAATKIVIST TÄITEMATERJALI KASUTAMINE PÕLETATUD PÕLEVKIVI
SIDEAINEGA 3D PRINDITAVAS BETOONIS

Crushed silicate rock as an aggregate and ground oil shale ash as binder in 3D
printable concrete

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Purustatud silikaatkivi mõju 3D prinditava betooni tugevusparameetritele, kus on sideaineks kasutatud tsementi.
2. Purustatud silikaatkivi mõju 3D prinditava betooni tugevusparameetritele, kus on sideaineks kasutatud põletatud põletatud põlevkivi.
3. Põletatud põlevkiviga tsemendi asendamise mõju 3D prinditava betooni tugevusparameetritele.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Alustada betooniretseptide valmistamisega.	26.01.2024
2.	Viimase betooniretsepti katsetamine.	29.03.2024
3.	Lõputöö kirjalik osa valmis mahus 90-100%.	06.05.2024

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20. mai 2024. a

Üliõpilane: Toomas Erik Uus 6. detsember 2023. a

Juhendaja: Mattias Põldaru 6. detsember 2023. a

SISUKORD

EESSÕNA	8
SISSEJUHATUS	9
1 TEOREETILISED ALUSED	10
1.1 3D prinditava betooni tehnoloogia.....	10
1.2 Levinud materjalid 3D printimise tehnoloogias.....	10
1.2.1 Metallid ja metallsulamid.....	11
1.2.2 Polümeerid	11
1.2.3 Keraamika.....	11
1.2.4 Tsement ja teised sideained	11
1.3 3D prinditava betooni eelised	12
1.3.1 Ehitamisele kuluv aeg	12
1.3.2 Maksumus.....	12
1.3.3 Tööohutus	13
1.4 3D prinditava betooni printimise meetodid	13
1.5 3D prinditava betooni armeerimine	14
1.6 Ehitusmaterjalide taaskasutamine betoonis	14
1.6.1 Põletatud põlevkivi	14
1.6.2 Purustatud silikaatkivi.....	17
1.7 Põlevkivi tehnoloogiad energeetikas – tuha teke	19
1.8 Põletatud põlevkivide ohtlikus	20
1.9 CFB põletatud põlevkivi kasutamine betoonis	21
1.10 Lisandite kasutamine betoonis	21
1.11 Betooni täitematerjalid	22
1.12 Täitematerjalide purustamise meetodid	24
1.13 Betoonisegu konsistents	24
1.14 Vesi-tsement tegur	25
1.15 Tsemendid	25
2 KATSEMETOODIKA.....	27
2.1 Sõelkövera optimeerimine	27
2.1.1 Sõelkövera määramine peen- ja jämeliival	27
2.1.2 Purustatud silikaatkivi sõelkövera määramine	30
2.1.3 Silikaatkivi purustamine.....	32
2.2 Silikaatkivi täitematerjaliga betoonisegude retseptuur	33
2.2.1 Retseptid põletatud põlevkiviga.....	33
2.2.2 Retseptid tsemendiga	34
2.3 Betoonisegude numeratsioon	34

2.4	Betoonisegude töödeldavuse määramine	34
2.4.1	Raputuslaual vajumi määramine	34
2.4.2	Tsemendiga betoonisegude retseptid ja vajumid raputuslaual	36
2.4.3	Põletatud põlevkiviga betoonisegude retseptid ja vajumid raputuslaual	39
2.5	Betoonisegude valmistamise protsess.....	41
2.5.1	Koostisosade kaalumine	41
2.5.2	Kuivsegude valmistamine	41
2.5.3	Märgsegude valmistamine	41
2.5.4	Segude tihendamine ja vormimine	42
2.6	Katsekehade hoiustamise tingimused	43
2.7	Katsekehade katsetamine	44
2.7.1	Kivistunud betooni tiheduse määramine	44
2.7.2	Survekatse	47
2.7.3	Paindetugevuse katse	49
2.7.4	Nakkekatse	51
2.7.5	Tõmbekatse	56
3	KATSETULEMUSTE ANALÜÜS.....	59
3.1	Betoon koos 10% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja tsemendiga.....	59
3.1.1	Survetugevus	59
3.1.2	Paindetugevus	60
3.1.3	Nakketugevus.....	61
3.1.4	Tõmbetugevus.....	62
3.2	Betoon koos 25% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja tsemendiga.....	63
3.2.1	Survetugevus	63
3.2.2	Paindetugevus	64
3.2.3	Nakketugevus.....	65
3.2.4	Tõmbetugevus.....	66
3.3	Betoon koos 10% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja põletatud põlevkiviga ..	67
3.3.1	Survetugevus	68
3.3.2	Paindetugevus	69
3.3.3	Nakketugevus.....	71
3.3.4	Tõmbetugevus.....	72
3.4	Betoon koos 25% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja põletatud põlevkiviga ..	74
3.4.1	Survetugevus	74
3.4.2	Paindetugevus	75
3.4.3	Nakketugevus.....	77
3.4.4	Tõmbetugevus.....	78
3.5	Tulemuste üldvõrdlus	79

3.5.1 Survetugevus	79
3.5.2 Paindetugevus	80
3.5.3 Nakketugevus.....	81
3.5.4 Tõmbetugevus	82
KOKKUVÕTE	84
KASUTATUD KIRJANDUS	88
LISAD	90
1. Survetugevuse katsekehade tabel.....	90
2. Paindetugevuse katsekehade tabel.....	98
3. Nakketugevuse katsekehade tabel	103
4. Tõmbetugevuse katsekehade tabel	108
GRAAFILINE OSA.....	111
1.1 Betoonide survetugevuste koondtabel	111
1.2 Betoonide survetugevuste koondgraafik.....	112
2.1 Betoonide paindetugevuste koondtabel.....	113
2.2 Betoonide paindetugevuste koondgraafik.....	114
2.3 Betoonide paindekatsekehade survetugevuste koondtabel	115
2.4 Betoonide paindekatsekehade survetugevuste koondgraafik.....	116
3.1 Betoonide nakketugevuste koondtabel.....	117
3.2 Betoonide nakketugevuste koondgraafik.....	118
4.1 Betoonide tõmbetugevuste koondtabel	119
4.2 Betoonide tõmbetugevuste koondgraafik	120

EESSÕNA

Soovin tänada lõputöö koostamisel abiks olnud kursusekaaslast Sander Sultsi, kes oli suureks abiks betoonisegude valmistamisel, tänan Rain Siegelit, kes oli abiks silikaatkivide purustamisel ning õppejõudu Tanel Tuisk, kes abistas hea nõuga standardite kasutamisel.

SISSEJUHATUS

Töö eesmärk on välja selgitada purustatud silikaatkivi lisamise mõju tugevuslikele omadusele, kui täitematerjali kogumassist 10% ja 25% ulatuses asendatakse purustatud silikaatkiviga. Uuritavad suurused on survetugevus, paindetugevus, nakketugevus ja tõmbetugevus. Katsed tehakse polüpropüleenfiibriga ja ilma ning sideainena on kasutatud tsementi või selle täielikku asendamist jahvatatud põletatud põlevkiviga.

Lõputöö käigus selgitatakse välja vajaliku töödeldavusega betooniretseptid, mis on eelduslikult sobilikud 3D betooni printimise tehnoloogia jaoks, kuna kasutavad peeneteralist täitematerjali ja on printimiseks sobiva töödeldavusega.

Maailmas liigutakse ökonoomsuse suunas ja Eesti Vabariigis on põletatud põlevkivi leidnud ehitusvaldkonnas kasutust betooni valmistamisel. 3D printimise tehnoloogia on üle maailma levinud, kuid Eestis on ehituse valdkonnas see pigem arengufaasis ja kasutatavad retseptid oleks hea asendada ökonoomsematega. Võrdluseks võib võtta Saksamaa ja Hiina, kus on ehituses 3D betooni printimine rohkem levinud. Samuti on oluline leida taaskasutust vanadele silikaatkividele, mida leidub üle Eesti pea igal pool – vanadest kortermajadest lehmalautadeni välja.

1 TEOREETILISED ALUSED

1.1 3D prinditava betooni tehnoloogia

3D prinditava betooni tehnoloogia efektiivne kasutamine sõltub suuresti sideainest ning segu töödeldavusest. Prinditav segu peab olema piisavalt vedel, et seda oleks võimalik pumbata läbi vooliku, kuid seejuures ei tohi segu kihthaaval printides laiali valguda. Olemasolevate uuringute põhjal eelistatakse kasutada tsementi sideainena 3D prinditava betooni koostises. [1]. Antud lõputöös valmistatakse 3D prinditava betooni segusid, mille sideaineks on ainult tsement CEM I 42 N ja ainult põletatud põlevkivi.

Võrreldes tavalise betooni valmistamise protsessiga, kus betoon segatakse valmis segistis, valatakse vormi või raketisse ja tihendatakse, siis 3D prinditava betooni valmistamine nõuab täpsemat kontrolli vee manustamisel ja töödeldavuse tagamisel. Enamasti kasutatakse erinevaid lisandeid töödeldavuse saavutamiseks – levinud on superplastifikaatorid, kiirendid ja aeglustid [1]. Antud lõputöö raames on kasutatud tsemendiga ja põletatud põlevkiviga 3D prinditava betooni retseptides superplastifikaatorit.

Printimise protsessis on vajalik ka robotika kasutamine [1]. Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse mäemaja katsehallis on betooni 3D printimiseks kasutusel 6 vabadusastmega robotkäsi. Robotkäe külge kinnitatakse survevoolik, mis on omakorda ühendatud mördipumbaga. 3D prinditava betooni kuivsegu segatakse ühtlaseks betoonisegistis. Pärast vee lisamist segatakse betooni märgsegu ühtlaselt läbi võimalikult homogenseks massiks ning valatakse pumba kolusse. Robotkäät iseloomustab tööraadius ja keerukas sfäärilaadne tööala. Autodesk AutoCAD tarkvara abil koostatud kolmemõõtmelises ruumis paikneva joone abil joonestatakse robotkäele ette soovitud liikumistrajektor. Joone paksuse muutmisega on võimalik muuta robotkäe liikumise kiirust. Prinditava kihi tegelik laius sõltub nii robotkäe liikumiskiirusest kui segu pumpamise kiirusest.

1.2 Levinud materjalid 3D printimise tehnoloogias

Enam levinud materjalid, mida kasutatakse 3D prinditavates toodetes on erinevad metallid, polümeerid, komposiidid, keraamika, tsement, erinevad pinnased ning soolad ja erinevad lisandid [2].

1.2.1 Metallid ja metallsulamid

Levinud metallid 3D prinditavas betoonis on roostevaba teras, alumiinium ja titaanium. Teisi metalle ja sulameid kasutatakse peamiselt väljaspool ehitusvaldkonda, näiteks kulda kasutatakse prinditavate ehete valmistamiseks ja nikli baasil sulameid lennutööstuses [2].

1.2.2 Polümeerid

Polümeere kasutatakse ehituses peamiselt ehitiste prototüüpide ehitamiseks ehk siis valmistatakse makette [2].

1.2.3 Keraamika

Keraamika printimistehnoloogia on levinud meditsiini tööstuses – proteeside valmistamine. Ehituses kasutatakse ka keraamika printimist, kuid seda on seni peetud kalliks tootmistehnoloogiaks ja seetõttu kasutatakse seda vähe. Ehitusvaldkonnas valmistatakse keraamikast kärje struktuuriga ülimalt täpseid elemente [2].

1.2.4 Tsement ja teised sideained

3D prinditava betooni eeliseks on võimekus valmistada erinevaid keeruka kuju või disainiga arhitekturseid elemente. 3D prinditav betoon toob alla ehituskulusid ja võimaldab aega kokku hoida. Kuna 3D prinditavas betoonis kasutatakse tavabetoonidega võrreldes rohkem tsementi, siis tsement viib betooni enda hinna kõrgeks. Samuti suurendab see CO₂ jalajälge.

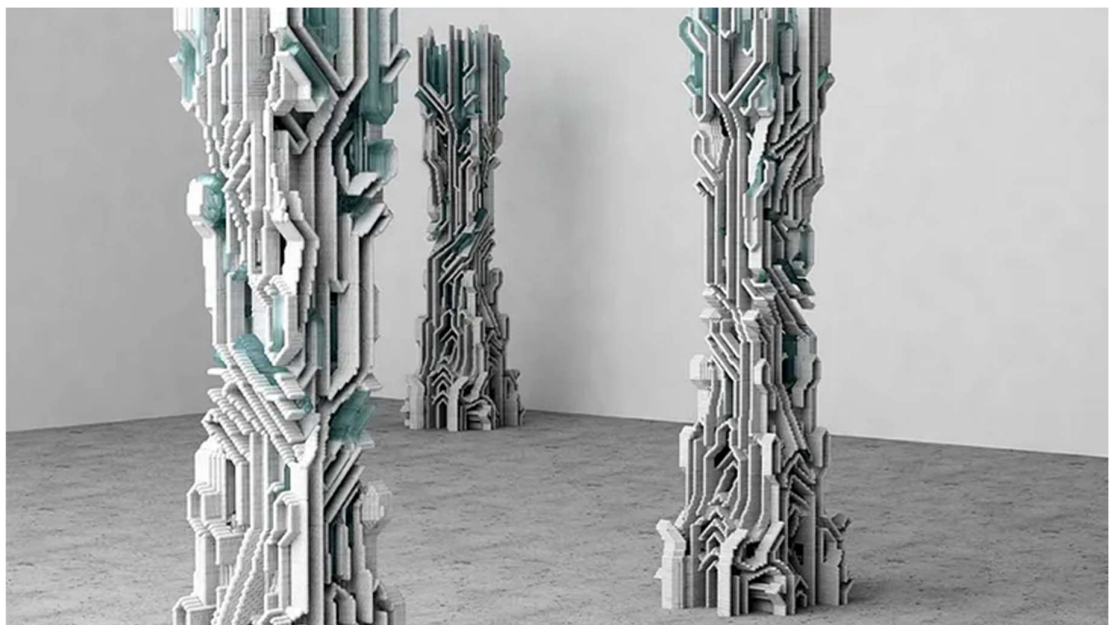


Foto 1. Dekoratiivsed 3D prinditud betoonist sambad [3].

1.3 3D prinditava betooni eelised

3D prinditava betooni eelised saab jagada peamiselt kolme erinevasse kategooriasse:

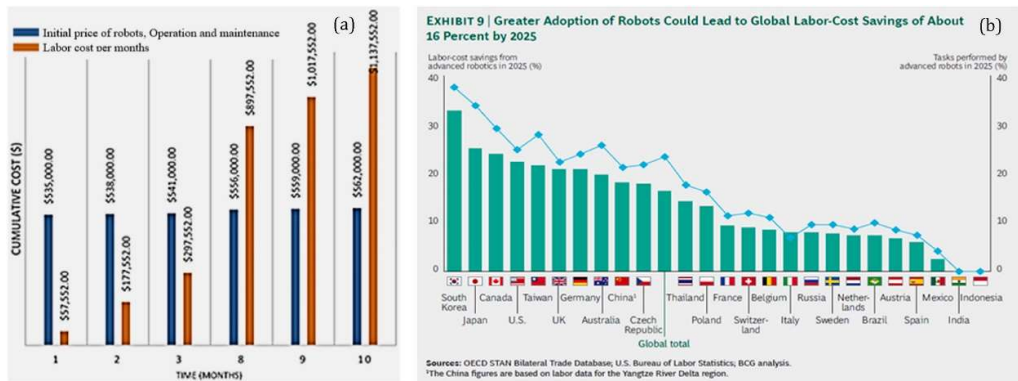
1.3.1 Ehitamisele kuluv aeg

Tavaliselt betoonkonstruktsiooni valmistamine ehitusplatsil on välja kujunenud selliselt: esmalt seotakse sarrusest karkass, seejärel ehitatakse ümber raketis, mida tuleb eelnevalt määrada spetsiaalse raketise õliga, et vähendada betooni naket raketise seintega, seejärel valatakse betoon raketisest valmistatud vormi ning tihendatakse ja tavaliselt järgmisel päeval rakestatakse vorm lahti, eeldusel, et betoon on ära tardunud. 3D prinditava tehnoloogia puhul on ajaline kulu, vaid üks neljandik ehitusplatsil valmistatava betooni valamiseks kuluvast ajast [2].

1.3.2 Maksumus

Tööjõu maksumuse kulu on 3D prinditava betooni tehnoloogiaga võimalik vähendada kuni 50%. Samuti on materjalikulu väiksem, sest on võimalik täpsemalt valmistada betoonist elemente. Väheneb ka ehitusvigade arv, mis tuleneb ehitajate poolt tehtud vigadest. Robotite kasutamine on maksumuse seisukohalt kasulik, kui ehitus kestab üle kaheksa kuu, sellest lühema perioodi puhul on odavam kasutada inimtööjõudu [2]. USAs tehtud uuringute põhjal on kogukulu betooni 3D printimisel 75\$/h, mis hõlmab endas masina operaatori ja masina rendikulu. Otstarbekas on printida keskmise suurusega keerukaid ehitusobjekte[2].

Lühiajalisel ehitamisel on optimaalne kasutada inimtööjõudu. 3D printimise tehnoloogia tasuvus on kasulik pikaajalisel ehitamise alates 8 kuust. 2025 aastaks prognoositav 3D printimise tehnoloogia kasutus riikide lõikes on suurim Lõuna-Koreas, Jaapanis ja Kanadas. Euroopa riikidest on Saksamaa. [2]



Joonis 1. Maksumuse võrdlusdiagramm [2]

1.3.3 Tööohutus

Statistiliselt saab igal aastal ehituses vigastuse 40 inimest 1000 inimese kohta USAs ja 52 inimest 1000 inimese kohta Austraalias. Eeldatakse, et ehituse automatiseerimise puhul risk oluliselt väheneb, sest suurema osa tööst teevad ära robotid ja parema väljaõppe saanud 3D printeri operaator [2].

1.4 3D prinditava betooni printimise meetodid

3D prinditava betooni printimise meetodid jagunevad peamiselt kaheks[4]:

- 1) Kihiline meetod – materjalikihid prinditakse teineteise peale. Tavaliselt tehakse seda mingit tüüpi robotiga – liikumine toimub nii horisontaalses kui vertikaalses suunas. [4]
- 2) Krohvipritsi meetod – krohv pritsitakse suure surve all [4]. Eeldab raketise või muu lahenduse olemasolu. See meetod võimaldab armeeringuga keerulise geomeetriaga betoonkonstruktsioone ehitada. Meetod on levinud USAs kuplite ehitamisel, tihtipeale tehakse seda inimtöõjõudu kasutades – töomes suunab voolikut. [5]

1.5 3D prinditava betooni armeerimine

Heal kivistunud betoonil on reeglina suur survetugevus, kuid betoon on habras materjal ja madala tõmbetugevusega. Selleks kasutatakse betoonis tavaliselt terasest sarrust – betooniga võetakse vastu survepinged ja tõmme võetakse vastu terasega. [6]

3D prinditava tehnoloogia puhul on mitu võimalust betooni tugevuse suurendamiseks. Võib kasutada erinevaid fiibreid – õiges mahus fiibri lisamine suurendab betooni tõmbetugevust. [7]

Kui kasutada terasarmatuuri siis variant on printida konstruktsioon etappidena – printida üks sein, teostada armeering ning seejärel seina teine külg ehk printida väliperimeeter ja armeering monolitiseerida tavalise betooniseguga. Kolmas variant on tardumata betoonisegu sisse koheselt paigaldada armatuurvardad – see eeldab täpsust ja kiirust. [7]

Neljas variant on printida segu armatuuri ümber kasutades selleks spetsiaalset düüsi. [7]

Viies variant on kasutada tugevdustraati, mida paigaldatakse paralleelselt printimisega. [7]

1.6 Ehitusmaterjalide taaskasutamine betoonis

1.6.1 Põletatud põlevkivi

2007. aastal tehtud uuringu põhjal kasutati betoonis Türgis põletatud põlevkivi, mis põletati temperatuuridel 650 °C ja 850 °C, koos tsemendiga (CEM I). Uuringu raames tsementi täielikult ei asendatud, vaid tehti katsekehad, kus asendati 15% tsemendi massist põletatud põlevkiviga ning katsekehad, kus asendati 30% tsemendi massist põletatud põlevkiviga [8].

28 päevase kivistumisperioodi järel jõuti järeldusele, et katsekehad, kus oli asendatud 15% tsemendi massist põletatud põlevkiviga, tulid paremate keemiliste kui füüsikaliste omadustega. Võrreldes varasemalt Eestis tehtud põletatud põlevkivi kasutamise uuringutega tuleb põletatud põlevkiviga betoon nõrgem 28 päeva kivistamise vältel kui katsekehad, kus on ainult tsementi sideainena kasutatud[8].

Mida suuremas osakaalus on tsement asendatud põletatud põlevkiviga, seda väiksema survetugevusega betooni tuleb 28 päevase kivistamisperioodi vältel. Pikaajaline põletatud põlevkiviga betooni kivistamine soodustab survetugevuse

suurenemist. Väikestes kogustes tsemendi asendamine põletatud põlevkiviga parandab betooni soojusjuhtivust [9].

2021. aasta uuringus katsetati Eestis erinevaid põletatud põlevkivide omadusi betoonilisandina[10]. Katsetati erinevaid tuhkasid:

Portlandtsement CEM I 42,5 N Kunda, CFB tuhk Auvere, CFB tuhk 8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-2 ja CFB tuhk + gaas 8. ploki elektrifiltri I välja tuhk, katel K-1 [6].

Tabel 1.6.1.1. Tsemendi ja originaaltuhkade keemilised ja füüsikalised omadused. [6]

Sideaine	Tihedus,	Eripind,	CaO,	Cl,	Kuumutuskadu, %			Terastiku koostis, %		
	g/cm ³	m ² /kg	%	%	105 °C	105-375 °C	375-975 °C	90 µm	63 µm	32 µm
CEM I 42,5 R	3,17	424	-	-	0,09	0,31	1,97	0,1	1,3	16,5
CFB A-or	2,92	602	18,53	0,29	0,02	0,03	5,82	0,1	1,0	9,9
CFB P-or	2,83	332	10,54	0,26	0,02	0,01	3,35	2,9	6,3	20,8
CFB G-or	2,78	326	10,7	0,30	0,01	0,03	3,69	5,8	7,6	21,8

Tabel 1.6.1.2. Jahvatatud tuhkade keemilised ja füüsikalised omadused. [6]

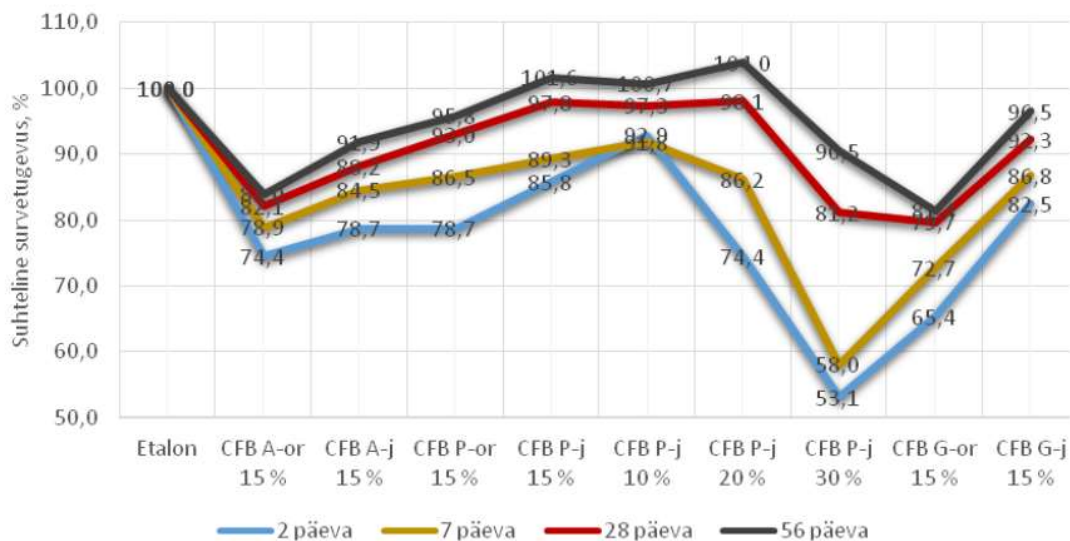
Sideaine	Tihedus,	Eripind,	CaO,	Terastiku koostis, %		
	g/cm ³	m ² /kg	%	90 µm	63 µm	32 µm
CFB A-j	2,92	1092	19,18	0,0	0,0	3,2
CFB P-j	2,83	695	10,53	0,0	0,2	4,5
CFB G-j	2,78	727	10,68	0,0	0,1	4,3

Tabel 1.6.1.3. Tsement - ja tuhkmörtide tugevused 28 päevaselt [6].

Sideaine	Veevajadus,	Paisumine,	Survetugevus, 28 päeva, N/mm ²						
	%	mm	Üksiktulemid						Keskmine
CEM I 42,5R	27,5	0,5	53,6	53,6	53,3	53,8	52,7	56,5	53,4
CFB A-or	39	2	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4	4,1
CFB A-j	32,5	0,5	15,4	15,1	14,9	14,4	14,6	14,3	14,8
CFB P-or	35	1	5,8	6,2	5,6	5,9	5,9	5,6	5,9
CFB P-j	29	0,5	22,2	21,5	22,3	21,5	21,4	21,8	21,8
CFB G-or	35	1,5	5,3	5,6	5,4	5,4	5,3	5,4	5,4
CFB G-j	28,5	1	31,2	31,4	30,9	31,4	31,5	32,2	31,4

Nagu näha, siis mida suurem on eripind, seda rohkem kulub vett ehk on suurem veevajadus. Tsemendile kõige lähedasema tugevuse andis CFB G-j markeeringuga retsept. [10]

Uurimistöös uuriti lisaks, kuidas betoonide suhtelised tugevused muutuvad 2 päeva vanuselt, 7 päeva vanuselt, 28 päeva vanuselt ja 56 päeva vanuselt. [10]



Joonis 2. Betoonide suhtelised survetugevused [10].

Enefit Power AS kodulehel on põletatud põlevkivile leitud peamiselt neli erinevat kasutusvaldkonda [11]:

- 1) Põllumajandus – kasutus väetisena, mis suurendab põldude saagikust ja loob paremad kasvutingimused taimedele
- 2) Ehitusmaterjalide tootmine – sobilik ehitusmaterjalide koostises. Näiteks gaasbetoonplokkides, teedeehituses või sadamaehituses.
- 3) Ammendunud nafta- ja gaasimaardlate sulgemine – tuha baasil valmistatud materjal takistab süsihappegaasi pääsemist puuraukudest atmosfääri.
- 4) Pinnase toetus.

Põletatud põlevkivi kasutatakse ka plastitööstuses. [11]

1.6.2 Purustatud silikaatkivi

2022. aasta uuringu põhjal Eestis taaskasutati edukalt purustatud silikaatkivist telliseid, mis pärinesid Kiviõli linnast, Keskpuiestee 43 korterelamust. [12]

Silikaatkivist tellistel määrati erinevad tugevusparameetrid ja omadused, milleks olid: tihedus, survetugevus, survetugevuse langus külmutus-sulatustsüklitel, huumuse sisaldus, veesisaldus, veeimavus ja survetugevus immutatud olekus. [12]

Tabel 1.6.2.1. Silikaatkivi omadused. [12]

Omadus	Katsekeha							Ühik
	SS1	SS2	VS1	VS2	1VK	5VK	2AL	
Huumus	värvusetu							-
Niiskuse sisaldus	1,7				3,0	7,8	9,5	%
Veeimavus	7,5	8,4	7,8	8,8				%
Survetugevus immutatud olekus	53,1	38,1	59,1	37,2				N/mm ²

Tabel 1.6.2.2. Silikaatkivide tihedused ja survetugevused. [12]

Katsekeha tähis	Tihedus (kg/m ³)	Survetugevus (N/mm ²)
1AL	1976	28,9
2AL	2020	35,5
1VP	1961	34,1
2VK	1944	40,8
3VV	1945	47,1
PÖ1	2016	40,5
4VV	2089	52,6
5VK	2008	44,1
6VP	1956	39,0
7VP	1925	33,3
8VP	1962	48,4
SS-11	1948	40,6
SS-12	1911	34,6

Tabel 1.6.2.2. Silikaatkivide tihedused ja survetugevused. [12]

Katsekeha tähis	Tihedus (kg/m ³)	Survetugevus (N/mm ²)
SS-13	1990	48,3
SS-14	1904	39,5
SS-15	1988	49,8
Keskmine	1971	41
Standardhälve	46,9	6,8
Uus kivi (AS Silikaat)	1850...1950	M25 (u. 24,5 N/mm ²)

Uuringu käigus kasutati purustatud silikaatkivi fraktsiooniga 0-2 mm ning fraktsiooniga 4-8 mm kuivsegudes täitematerjalina. 0-2 mm fraktsiooniga purustatud silikaatkivi kasutati 45% kuivaine kogumassist. Teises retseptis kasutati fraktsiooni 0-2 mm 45% kuivaine kogumassist ja 4-8 mm fraktsiooni 30% kuivaine kogumassist. [12]

Tabel 1.6.2.3. Kleepsegu retsept. [12]

Koostis komponent	%	kg
Tsement	25	0,75
Taaskasutatud silikaatkivi fr 0-2mm	45	1,35
Uus liiv fr 0-2mm	30	0,9
Tardumise kiirendi	0,25	0,0075
Superplastifikaator	0,02	0,0006
Veehoidvust suurendav lisand	0,05	0,0015
Kokku:	100	3,010
Vesi		0,522

Tabel 1.6.2.4. Betoonisegu retsept [12].

Koostiskomponent	%	kg
Tsement	25	1,0
Taaskasutatud silikaatkivi fr 0-4mm (peentäide)	45	1,8
Taaskasutatud silikaatkivi fr 4-8mm (jämetäide)	30	1,2
Superplastifikaator	0.02	0,0008
Kokku:	100	4,001
Vesi		0,785

Oluline on märkida, et purustatud silikaatkivi suurendab kuivsegu veevajadust ja seda nii jämedal kui peenel fraktsioonil [12]. Purustatud silikaatkivi saab kasutada müürimörtide valmistamiseks, krohvimörtide valmistamiseks, plaatimissegude valmistamiseks ja kuivsegu betoonide valmistamiseks. [12]

1.7 Põlevkivi tehnoloogiad energeetikas – tuha teke

Põlevkivi kasutatakse energeetika valdkonnas peamiselt kahel moel [13]:

- 1) Tolmpõletamine (lühend PF) – kütus eelnevalt jahvatatakse, seejärel suunatakse aroseguna põletite kaudu koldesse. Soojus antakse üle koldeekraanidele, kütuse mineraalosas toimuvad muundusprotsessid, mille saaduseks on tuhk. Tuhk jaguneb kaheks: lendtuhaks ja katla põhja jäävaks põhjatuhaks. Osakesed, mille hõljumiskiirus on väiksem kui gaasi kiirus, kanduvad koldest välja, raskemad osakesed langevad raskus- ja tsentrifugaaljõu mõjul kolde põhja. Tuhamineraalid moodustuvad kõrgetel temperatuuridel (900-1400 °C). [13]
- 2) Keevkihtpõletamine (lühend CFB) – Keevkihi puhul toimub tsirkuleerimine – koldest lahkuv põlemisgaas ja tuha osakesed suunatakse separaatorisse, kus mõõtmetelt suuremad ja raskemad tuhaosakesed sorteeritakse välja ja suunatakse koldesse tagasi. Sedasi moodustub tahkefaasi ringluskontuur. Põletamine toimub madalamal temperatuuril kui PF meetodi puhul. Ka tuha kvaliteedis on erinevus – CFB meetodil saadud tuhk on sideaine kasutamise võimaluste kontekstis kehvemate omadustega kui PF meetodi puhul. [13]

1.8 Põletatud põlevkivide ohtlikus

Eestis uuriti erinevate elektrijaamade põletatud põlevkivisid. Jaamade loetelu, kust tuhkasid uuriti [14]:

- 1) Auvere 300 MW_{el} CFBC (tsirkuleeriv keevkiht katel, edaspidi CFB või CFBC) katlaga Alstom/GE elektrijaam
- 2) Eesti elektrijaama (EEJ) ja Balti Elektrijaama (BEJ) CFBC katlad
- 3) Tolmupõletustehnoloogia – NID-iga varustatud 185 MW_{el} tolmpõletus energiaplokid
- 4) Tolmupõletustehnoloogia – 185 MW_{el} tolmpõletus energiaplokk
- 5) Enefit 280
- 6) Enefit 140
- 7) Petroter

Uuringust järeldati, et jälgelementide ja sealhulgas raskemetallide sisaldus põletatud põlevkivis on madal. Määruse EL nr. 1357/2014 alusel liigituvad põletatud põlevkivid ohtlikuks koodiga HP 4 ja/või HP 8 tulenevalt põletatud põlevkivide kõrgest lubja sisaldusest. [14]

Tulenevalt põletatud põlevkivi kvartsilise liiva ja kristalse lubja sisaldusest saab liigitada osad põletatud põlevkivid ka klassidesse HP 5, HP 6, HP 7, HP 11 ja HP 13. [14]

Definitsioonid HP4 ja HP8 Määruse EL nr. 1357/2014 järgi [15]:

HP 4 – ärritav – nahka ärritav ja silmi kahjustav,

HP 5 – mürgisus sihtelundi suhtes/hingamiskahjustusi tekitav - jäätmed, mis võivad põhjustada mürgisust sihtelundi suhtes, kas kokkupuutel või, mis põhjustavad ägedat mürgistust sissehingamisel,

HP 6 – äge mürgisus - jäätmed, mis võivad põhjustada ägedat toksilist mõju suukaudsel või nahakaudsel manustamisel või sissehingamisel,

HP 7 – kantserogeenne - jäätmed, mis tekitavad vähktõbe või suurendavad selle esinemissagedust,

HP 8 – söövitav – jäätmed, mis võivad kokkupuutel põhjustada naha söövituse,

HP 11 – mutageenne - jäätmed, mis võivad põhjustada mutatsiooni – püsivat muutust raku geneetilise materjali koguses või struktuuris,

HP 13 – sensibiliseeriv - jäätmed, mis sisaldavad üht või mitut ainet, millel on teadaolevalt ülitundlikkust tekitav toime nahale või hingamisteedele.

1.9 CFB põletatud põlevkivi kasutamine betoonis

2014. aastal Eestis tehtud uuringu põhjal kasutati betooni valmistamisel erinevas osakaalus sideainena CFB meetodil saadud põletatud põlevkivi. Põletatud põlevkivi lisati osakaalus 20%, 50%, 80% ja 100% sideaine kogumassist. Uurimistöö käigus järeldati, et 20-80% osakaalus tuha kasutamine on soodne viis jäätme taaskasutamiseks betoonis. 100% lisamisel sideaine kogumassist betooni survetugevus langes. Veevajadus on suurem kui tsemendiga betoonil sama töödeldavuse saavutamiseks. Tuha lisamine mõõdukas koguses suurendab betooni veekindlust. [16]

1.10 Lisandite kasutamine betoonis

Standardi „EVS-EN 934-2:2009+A1:2012. Betooni, mördi ja süstmördi keemilised lisandid. Osa 2: Betooni keemilised lisandid. Määratlused, nõuded, vastavus, tähistus ja sildistus“ kohaselt betooni lisanditeks loetakse ainet, mida kasutatakse betoonile segamise käigus betoonisegu ja/või kivistunud betooni omaduste muutmiseks koguses, mis ei ületa 5% betooni tsemendi massist. Lisandid jaotatakse [17]:

- 1) veevajadust vähendav/plastifitseeriv lisand (plastifikaator),
- 2) veevajadust suurel määral vähendav/superplastifitseeriv lisand,
- 3) veehoidvust suurendav lisand,
- 4) õhku manustav lisand,
- 5) tardumist kiirendav lisand,
- 6) kivistumist kiirendav lisand,
- 7) tardumist aeglustav lisand,
- 8) veeimavust vähendav lisand (hüdrofobisaator),
- 9) tardumist aeglustav/veevajadust vähendav/plastifitseeriv lisand,
- 10) tardumist aeglustav/veevajadust suurel määral vähendav/plastifitseeriv lisand,

11) viskoossust muutev lisand.

1.11 Betooni täitematerjalid

Standardi „EVS-EN 12620:2005+A1:2008.Betooni täitematerjalid“ kohaselt on täitematerjal teraline materjal, mida kasutatakse ehituses. Täitematerjalid võivad olla looduslikud või tehislikud, tänapäeva kontekstis ka taaskasutatav. Täitematerjalil ei tohi olla ülemise tera D ja väikseima tera d suuruse suhe olla rohkem kui 1,4. [18]

Täitematerjale saab jaotada terastikulise koostise järgi [18]:

- 1) jäme-täitematerjaliks,
- 2) peen-täitematerjaliks,
- 3) loodusliku terastikulise koostisega 0/8 mm täitematerjaliks,
- 4) fraktsioneerimata täitematerjaliks.

Eraldi käsitletakse ka fillereid ehk ülipeenikest täitematerjali. [18]

Tabel 1.11.1. Terastikulise koostise üldnõuded. [18]

Täitematerjal	Terasuurus mm	Sõela läbind massiprotsentides					Kategooria G^d
		2D	1,4D ^{a&b}	D ^c	d ^b	d/2 ^{a&b}	
Jäme-	$D/d \leq 2$ või	100	98...100	85...99	0...20	0...5	$G_C85/20$
	$D \leq 11,2$	100	98...100	80...99	0...20	0...5	$G_C80/20$
	$D/d > 2$ ja $D > 11,2$	100	98...100	90...99	0...15	0...5	$G_C90/15$
Peen-	$D \leq 4$ ja $d = 0$	100	95...100	85...99	-	-	G_F85
Loodusliku terastikulise koostisega 0/8 mm	$D = 8$ ja $d = 0$	100	98...100	90...99	-	-	$G_{NG}90$
Fraktsioneerimata	$D \leq 45$ ja $d = 0$	100	98...100	90...99	-	-	G_A90
		100	98...100	85...99	-	-	G_A85

^a Kui ISO 565:1990 seerias R20 ei ole arvutuslikule avale 1,4D ja d/2 täpselt vastavaid sõelu, tuleb kasutada lähima avamõõtmega sõela.

^b Katkendliku terastikuga betooni korral või teistel erijuhtudel võidakse spetsifitseerida täiendavaid nõudeid.

^c Sõela D läbindi massiprotsent võib olla suurem kui 99 %, kuid sel juhul peab tootja dokumenteerima ja deklareerima tüüpilise terastikulise koostise, kasutades sõelu D, d, d/2 ja sõelu baasreast pluss reast 1 või baasreast pluss reast 2 vahemikus d kuni D. Kui sõelte suhe on väiksem kui 1,4-kordne, võib järgmise alumise sõela ära jätta.

^d Täitematerjalide teistes tootestandardites on kategooriatele teistsugused nõuded.

Tabel 1.11.2. Nõuded filleri terastikulisele koostisele. [18]

Sõela ava mm	Läbind massiprotsentides	
	Üksiktulemuste üldvahemik	Tootja deklareeritud maksimaalne vahemik ^a
2	100	-
0,125	85...100	10
0,063	70...100	10

^a Tootja poolt vähemalt 20 tulemuse alusel deklareeritud terastikulise koostise vahemik (vt tabel H.1, rida 1). 90 % tulemustest peab jääma sellesse vahemikku, kusjuures kõik tulemused peavad jääma terastikulise koostise üldvahemikku (vt tabeli veerg 2).

1.12 Täitematerjalide purustamise meetodid

Täitematerjale purustatakse, et saada väiksemaid fraktsioone. Reeglina purustatakse massiivne osa ja seejärel teiste meetoditega purustatakse järgmistes etappides täitematerjal soovitud fraktsiooniks. Purustamine võib olla ka kinnise ringina, mis tähendab, et kui materjal ei ole piisavalt peeneks purustatud, et soovitud fraktsiooni saavutada, saadetakse osaliselt purustatud materjal uuesti purustisse, kuni lõpuks saadakse sobiva fraktsiooniga täitematerjal. Täitematerjalid võivad puruneda sõltuvalt purustusmeetodist erineva kujuga, seega on oluline valida õige purustamismeetod. [19]

Levinud purustid on [19]:

- 1) lõugpurusti,
- 2) pöördpurusti,
- 3) koonuspurusti,
- 4) haamerpurusti.

Täitematerjalide purustamisel on oluline teada, kas materjali purustati löögiga või survega. Survega purustatud materjalide puhul kipuvad tekkima materjalis sisepinged ning materjal võib hiljem kasutamise käigus praguneda. [20]

1.13 Betoonisegu konsistents

Betoonisegu töödeldavust ehk konsistentsi mõõdetakse koonuse vajumiga. Katse viiakse läbi vastavalt standardile „EVS-EN 12350-5:2019. Betoonisegu katsetamine. Osa 5: Valguvuskatse“. Konsistentsi kirjeldatakse tähisega S1 kuni S5, kus S1 tähistab paksu, raskesti töödeldavat ja jäika segu ning S5 hästi töödeldavat ja vedelat betoonisegu.[21]

Tabel 1.12. Betoonisegu konsistentsid. [21]

Klass	S1	S2	S3	S4	S5
Koonuse vajum mm	10 kuni 40 mm	50 kuni 90 mm	100 kuni 150 mm	160 kuni 210 mm	220 mm

Katse kohaselt asetatakse eelnevalt niisutatud koonus valguvuslauale mõõtmetega 700 mm x 700 mm ning mille pind on kaetud vähemalt 2 mm paksuse metall-lehega. Metalli pind peab olema korrosioonikindel ja tsemendipastaga

mittereageeriv. Laua peale asetatakse õõneskoonus, mille ülemine läbimõõt on 200 mm ja alumine läbimõõt 300 mm. Betoonisegu kühveldatakse koonusesse ja tihendatakse tambiga kahes võrdses kihis 10 löögiga kihi kohta. Koonus tõstetakse käepidemetest ühtlasel kiirusel üles 1 kuni 3 sekundiga. Koonust peab tõstma betooni lisamisest ajavahemikus 10 kuni 30 sekundit. Mõõdulindi või joonlauaga mõõdetakse kaks laiemat valgumiskohta (kahes suunas) ja arvutatakse nende põhjal keskmine laialivalgumise diameeter.[22]

1.14 Vesi-tsement tegur

Vesi-tsement tegur on betoonisegu efektiivse veesisalduse ja tsemendisalduse massipõhine suhe. Levinud suhe on 0,40-0,60. Suhtega 0,3 on betoonisegu üpriski väikese töödeldavusega – betoon tuleb reeglina tugevam. Selleks lisatakse plastifikaatorit või superplastifikaatorit, et betoonisegu töödeldavust parandada. Suhtega 0,8 tuleb vedel betoonisegu, kuid kivistunud betooni tugevusomadused on madalad. Liigse vee lisamisel suureneb poorsus ja väheneb tihedus. Liiga väikese veekoguse lisamisel tsemendis keemilised reaktsioonid kristallstruktuuri tekkimisel ei ole lõplikud ehk reaktsioonid jäävad pooleli. [23], [24]

1.15 Tsemendid

Harilike tsementide koostis on välja toodud standardis „EVS-EN 197-1:2011. Tsement. Osa 1: Harilike tsementide koostis, spetsifikatsioonid ja vastavuskriteeriumid“. Standard määratleb ära 27 erinevat tsemendi tüüpi.

Standardikohane definitsioon on: „Tsement on hüdrauliline sideaine (peeneks jahvatatud anorgaaniline materjal), mis veega segatult moodustab hüdratiseerimisreaktsioonide- ja protsesside tagajärjel tarduva ja kivineva massi ning säilitab oma tugevuse ja stabiilsuse ka vee all.“[25]

Tsemente jaotatakse viide põhigruppi [25]:

- 1) CEM I – portlandtsement,
- 2) CEM II – portland-komposiittsement,
- 3) CEM III – räbutsement,
- 4) CEM IV – putsolaantsement,
- 5) CEM V – komposiittsement.

Tsemendi eeltugevuseks loetakse 2-päevast või 7-päevast survetugevust. Tsemendil on levinud lisatähiste kasutamine, R, L ja N [25]:

N - tavalise eeltugevusega klass,

R – kõrge eeltugevusega klass,

L – väikese eeltugevusega klass.

Tabel 1.17. Normväärtusena määratletud mehaanilised ja füüsilised nõuded. [25]

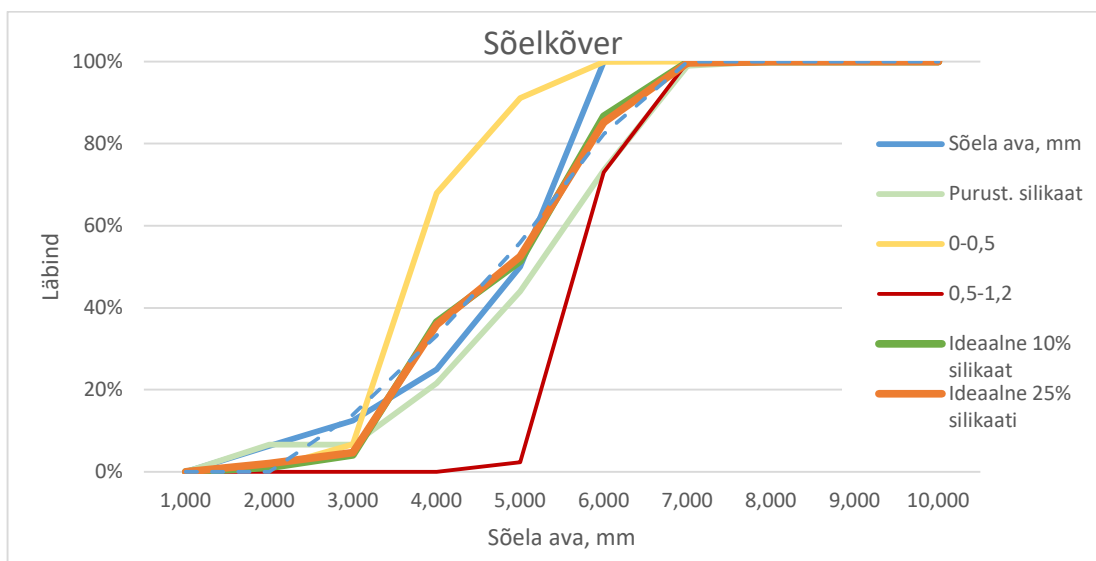
Tugevus-klass	Survetugevus MPa			Tardumise algus	Mahu- püsivus (paisumine)
	Eeltugevus		Normtugevus		
	2-päevane	7-päevane	28-päevane	min	mm
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 N	-	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 L ^a	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 N	≥ 10,0	-			
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 L ^a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

^a Tugevusklass on ette nähtud ainult CEM III tsementidele.

2 KATSEMETOODIKA

2.1 Sõelkõvera optimeerimine

Sõelkõvera optimeerimiseks koostati tabel, mis kajastas sõelkõveraid olemasoleval peenliival, jämeliival ja purustatud silikaatkivil. Aluseks võeti ideaalse liiva sõelkõver Allen Hazen ja William C. Andersoni järgi (edaspidi A&A sõelkõver). Olemasoleva peenliiva, jämeliiva ja purustatud silikaatkivi sõelkõverad lisati ühisele graafikule koos ideaalse peenliiva ja jämeliiva ning A&A sõelkõveratega. Üksiksõelte erinevuste standardhälbe kaudu leiti kombinatsioonide võrdlemise teel ideaalsele sõelkõverale võimalikult lähedane sõelkõver, ilma et täitematerjali peaks täiendavalt ümber fraksioneerima, selliselt saadi täitematerjali komponentide omavahelised osakaalud.



Graafik 2.1.1. Peenliivade ja purustatud silikaatkivi sõelkõverad.

2.1.1 Sõelkõvera määramine peen- ja jämeliival

Antud lõputöö raames kasutati täitematerjaliks peenliiva fraktsiooniga 0-0,5 mm; peenliiva fraktsiooniga 0,5-1,2 mm ja purustatud silikaatkivi fraktsiooniga 0-2 mm. Liivadest täitematerjalile määrati sõelkõver standardi „EVS-EN 933-1:2012 - Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod“ alusel. [26]

EVS-EN 933-1:2012 standardi meetodi järgi sõelkõvera määramiseks läheb vaja järgmiseid vahendeid [26]:

- 1) sõelumismasin,
- 2) katsesõelad, mis vastavad standarditele EN 933-2, ISO 3310-1 või ISO 3310-2,
- 3) sõeltega tihedalt sobituv kaas,
- 4) kaalud,
- 5) kandikud,
- 6) kuivatuskapp.

EVS-EN 933-1:2012 standardi kohaselt tuleb katseproov kuivatada konstantse massini kuivatuskapis temperatuuril 110 ± 5 °C, lasta jahtuda ja seejärel kaaluda. [26]

Katsemassi kogus valiti tulenevalt EVS-EN 933-1:2012 tabelist 1. Tabeli alusel on täitematerjali suurima nimimõõdme järgi vaadatuna väikseim fraktsiooni suurus 4 mm. Sellest suurusest tulenevalt kõigi fraktsioonide puhul, mis on väiksemad kui 4 mm, tuleb katsemassiks võtta vähemalt 200 grammi materjali [26]. Mõlema liiva sõelkõvera määramisel võeti katseproov massiga 1500 grammi.

Standardi EVS-EN 933-1:2012 tabel 1 on välja toodud silikaatkivi sõelkõvera määramise peatükis.

Sõelumiseks tuleb valada ära kaalutud täitematerjal pealmisele sõelale ja sulgeda kaanega. Lõputöö katsete läbiviimisel kasutati standardile EVS-EN 933-1:2012 vastavalt sõelte komplekti ja sõelumismasinat. Sõelumise ajaks valiti masinal 10 minutit. Sõelkõvera tulemus on kajastatud sama standardi lisa C kohase tabeli järgi.

Tabel C 1.1. Peenliiva sõelumistulemused [26]

Peenliiv fraktsiooniga 0-0,5 mm sõelumise tulemus			
Sõelaava	Sõelale jäänud materjali mass R_i	Sõelale jäänud materjal protsentides $100 \times R_i/M_1$	Täislabind protsentides $100 - \Sigma(100 \times R_i/M_1)$
mm	g	%	%
0	13,52	0,9013	0
0,063	87,22	5,81	0,24
0,125	916,33	61,09	0,26
0,25	346,68	23,11	9,08
0,5	132,38	8,83	32,20
1	0,29	0,0193	93,28
2	0	0	99,10
Kokku:	1496,42	99,76	
Kogu kuivmass [g] $M_1=$	1500		

Tabel C 1.2. Peenliiva sõelumistulemused [26]

Peenliiv fraktsiooniga 0,5-1,2 mm sõelumise tulemus			
Sõelaava	Sõelale jäänud materjali mass R_i	Sõelale jäänud materjal protsentides $100 \times R_i/M_1$	Täislabind protsentides $100 - \Sigma(100 \times R_i/M_1)$
mm	g	%	%
0	0,08	0,0053	0
0,063	0,15	0,010	0
0,125	0,06	0,0040	27
0,25	34,77	2,32	98
0,5	1057,81	70,52	99,98
1	402,81	26,85	99,98
2	0,12	0,0080	99,99
Kokku:	1495,8	99,72	
Kogu kuivmass [g] $M_1=$	1500		

Tabel C 1.3. Purustatud silikaatkivi sõelumistulemused [26]

Purustatud silikaatkivi sõelumise tulemus			
Sõelaava	Sõelale jäänud materjali mass R_i	Sõelale jäänud materjal protsentides $100 \times R_i/M_1$	Täisläbind protsentides $100 - \Sigma(100 \times R_i/M_1)$
mm	g	%	%
0	13,30	6,65	0
0,063	0,00	0	1
0,125	30,00	15	27
0,25	44,70	22,35	56
0,5	59,00	29,5	78
1	51,00	25,5	93
2	2,00	1	93
Kokku:	200	100	
Kogu kuivmass [g] $M_1 =$	200		

2.1.2 Purustatud silikaatkivi sõelkõvera määramine

Purustatud silikaatkivi sõelkõvera määramine toimus samamoodi nagu liivadel ehk lähtuti standardist „EVS-EN 933-1:2012 - Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod“.

EVS-EN 933-1:2012 standardi kohaselt on soovituslik katseproov kuivatada ühtlase konstantse massini kuivatuskapis temperatuuril 110 ± 5 °C, lasta jahtuda ja ära kaaluda [26]. Antud lõputöö raames kuivas silikaatkivi toatemperatuuril +22°C kolme kuu pikkusel perioodil ning eeldati, et silikaatkivi on piisavalt kuivanud.

Katsemassi kogus valiti tulenevalt EVS-EN 933-1:2012 standardis välja toodud tabelist nr 1. Tabeli alusel on täitematerjali suurima nimimõõtme järgi vaadatuna väikseim fraktsiooni suurus 4 mm. [26]

Standardi EVS-EN 933-1:2012 tabel 1. [26]

Täitematerjali suurim nimimõõde D (maksimaalne) mm	Täitematerjali mass kg	Kergtäitematerjali maht liitrit
90	80	-
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

MÄRKUS 1 Täitematerjali teiste, 90 millimeetrist väiksemate fraktsioonide puhul võib katseproovi minimaalse suuruse määrata tabelis 1 antud masside interpoleerimise teel, kasutades valemit $M = (D/10)^2$, kus M = katseproovi minimaalne mass kg;
 D = täitematerjali terasuurus mm.

MÄRKUS 2 Kui katseproovi suurus on tabelis 1 antust väiksem, võib katsemeetodi täpsus väheneda. Sel juhul tuleb katseproovi suurus katseprotokollis esitada (9.2).

MÄRKUS 3 Kui täitematerjali terade tihedus on suurem kui $3,00 \text{ Mg/m}^3$ (vaata EN 1097-6), tuleks selleks, et katseproovi maht oleks ligikaudu sama kui tavalise tihedusega täitematerjali puhul, tabelis 1 antud katseproovi massi tiheduste suhte põhjal korrigeerida.

MÄRKUS 4 Standardile EN 13055 vastavate kergtäitematerjalide sobiv minimaalne katseproovi suurus tuleb valida mahuveerust. Täitematerjali teiste terasuuruste korral tuleb mahu määramiseks kasutada interpoleerimist.

Sõelumiseks tuleb valada ära kaalutud täitematerjal pealmisele sõelale ja sulgeda kaanega. Lõputöös kasutati standardile EVS-EN 933-1:2012 vastavat sõelte komplekti ja sõelumismasinat. Sõelumise ajaks valiti masinal 10 minutit. Sõelkövera tulemus on kajastatud käsitletava standardi lisa C kohase tabeli järgi.

2.1.3 Silikaatkivi purustamine

Silikaatkivi purustamist saab antud magistritöö raames jaotada kolmeks etapiks:

- 1) silikaatkivist müüritise osa purustamine perforaatoriga,
- 2) purustatud silikaatkivimüüritise purustamine väiksemaks fraktsiooniks lõugpurustit kasutades,
- 3) purustatud silikaatkivi käsitsi sõelumine.

Silikaatkivi müüritis oli lõputöö katsete algusajaks ladustatud ehitusmaterjalide laboratooriumi kõrvale. Müüritise osad olid kaetud killega, kaitsmaks materjali sademete eest.

Silikaatkivist müüritise purustamiseks kasutati järgnevaid vahendeid:

- perforaator DeWALT D25133K-QS,
- anum või suurem ämber purustatud kivide kokku kogumiseks,
- kaitseprillid, kõrvatropid, töökindad.

Silikaatkivid purustati õues. Kuna müüritise kive hoiustati välikeskkonnas, siis pärast kivide purustamist paigutati purustatud kivid, mille pikima mõõtme suurus oli kuni seitse sentimeetrit, siseruumi kuivama. Silikaatkivide purustamine toimus 2023. aasta novembris. Purustatud silikaatkivide kuivatusperiood oli 3 kuud.

Pärast kivide kuivatamist kivid purustati. Purustamiseks kasutati suhteliselt väikest labori lõugpurustit. Kuna lõugpurusti eraldab müra ja silikaatkivide purustamisest lendleb õhku palju peenikest tolmu, olid töö juures hädavajalikud kuulmiskaitse ja respiraator.

Lõugpurustiga purustatud peenike silikaatkivi killustik sõeluti käsitsi 2,0 mm avaga sõelaga. Kasutatav sõel vastas standarditele EN 933-2, ISO 3310-1 ja ISO 3310-2. Sõela ava suurus valiti 3D printimiseks kasutatava seadmestiku piirangute järgi. Nimelt liiga suure fraktsiooniga täitematerjali pumpamine kruvipumbaga võib osutuda võimatuks. Teise faktorina tuleb arvestada materjali enda omadustega – silikaatkivist killustik pudeneb juba ka näppude vahel ning liiga suured tükid betooni kuivsegu ja määrgsegu segamisel võivad laguneda peenemaks fraktsiooniks, mis omakorda suurendab veevajadust töödeldavuse saavutamiseks.

Enne sõelkõvera määramist lõugpurustiga purustatud silikaatkivi sõeluti käsitsi läbi kasutades selleks kuni 2 mm suuruse sõelavaga katsesõela.

2.2 Silikaatkivi täitematerjaliga betoonisegude retseptuur

Antud lõputöö raames valmistati kokku 15 erinevat 3D printitava betooni retsepti. Retseptid saab jaotada neljaks erinevaks kategooriaks:

- 1) retseptid, kus on silikaatkivi kasutatud 10% täitematerjalist, polüpropüleenfiibriga ja ilma polüpropüleenfiibrita ning sideaineks on tsement CEM I 42 N,
- 2) retseptid, kus on silikaatkivi kasutatud 25% täitematerjalist, polüpropüleenfiibriga ja ilma polüpropüleenfiibrita ning sideaineks on tsement CEM I 42 N,
- 3) retseptid, kus on silikaatkivi kasutatud 10% täitematerjalist, polüpropüleenfiibriga ja ilma polüpropüleenfiibrita ning sideaineks on põletatud põlevkivi,
- 4) retseptid, kus on silikaatkivi kasutatud 25% täitematerjalist, polüpropüleenfiibriga ja ilma polüpropüleenfiibrita ning sideaineks on põletatud põlevkivi.

Retseptidel on veel omakorda teine alajaotus:

- 1) retseptid, mille veevajadus on määratud raputuslaual optimaalse vajumi järgi,
- 2) retseptid etalonseguga võrdse veesisaldusega.

2.2.1 Retseptid põletatud põlevkiviga

Lõputöös kasutatud põletatud põlevkivi on pärit Auvere külas asuva Eesti Elektriijaama 8. plokist, mis on keevkiht põletuse tehnoloogial (CFB). Põlevkivi on täiendavalt jahvatatud Kunda Nordicus, jahvatuspeenuse on üle 5000 m²/kg.

Põletatud põlevkiviga valmistati järgmise tähistusega retseptid: P10e, P10v, P25e, P10ef, P10vf, P25ef ja P25vf.

Retseptid P10e ja P10v on ilma polüpropüleenfiibrita ning täitematerjali kogumassist on lisatud 10% purustatud silikaatkivi. Retsept P10e on ilma polüpropüleenfiibrita ja täitematerjali kogumassist on lisatud 25% purustatud silikaatkivi. Retseptid P10ef ja P10vf on polüpropüleenfiibriga ning täitematerjali kogumassist on lisatud 10% purustatud silikaatkivi. Retseptid P25ef ja P25vf on polüpropüleenfiibriga ning täitematerjali kogumassist on lisatud 25% purustatud silikaatkivi.

2.2.2 Retseptid tsemendiga

Tsemendiga valmistati järgmise tähistusega retseptid: T10e, T10v, T25e, T25v, T10ef, T10vf, T25ef ja T25vf. Katsekehade valmistamisel kasutati tsementi SCHWENK Super Cement CEM I 42,5 N.

Retseptid T10e ja T10v on ilma polüpropüleenfiibrita ning täitematerjali kogumassist on lisatud 10% purustatud silikaatkivi. Retseptid T25e ja T25v on ilma polüpropüleenfiibrita ning täitematerjali kogumassist on lisatud 25% purustatud silikaatkivi. Retseptid T10ef ja T10vf on polüpropüleenfiibriga ning täitematerjali kogumassist on lisatud 10% purustatud silikaatkivi. Retseptid T25ef ja T25vf on polüpropüleenfiibriga ning täitematerjali kogumassist on 25% asendatud purustatud silikaatkiviga.

2.3 Betoonisegude numeratsioon

3D printitava betoonisegude retseptide jaoks kasutati järgmist retseptuuri tähistust:

PXXef, PXXvf, TXXvf või TXXef, kus esimene suur täht tähistab sideainet – „P” on põletatud põlevkivi ja „T” on tsement; kus „XX” tähistavad purustatud silikaatkivi protsentuaalset osakaalu suurust täitematerjali kogumassist (10 või 25); alaindeks „v” tähistab vajumi järgi veesisaldust ja „e” alaindeks tähistav etaloni järgi veesisaldust. Alaindeks „f” tähendab, et betoonisegu on fiibriga.

Katsekehadele on märgistatud ära retsept ja eraldi katsekeha number. Paindekateks mõeldud prismade numeratsioon on 1-9, survetugevuse katseks ja nakketugevuse katseks mõeldud kuupide numeratsioon 1-24 ja otsese tõmbetugevuse katsekehadeks mõeldud kaheksa-kujulised katsekehad on numeratsiooniga 1-6.

2.4 Betoonisegude töödeldavuse määramine

2.4.1 Raputuslual vajumi määramine

Raputuslual betoonisegude vajumi määramiseks lähtuti standardist „EVS-EN 1015-3:2004+A2:2007 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 3: Mördisegu konsistentsi määramine (raputuslual)”. [27]

Etalonsegude veevajadus määrati raputuslual selliselt, et betoonisegu vajum oleks 150 ± 5 mm. Suurusjärk 150 ± 5 mm valiti tulenevalt 3D printeri jaoks sobiliku töödeldavuse vajadusest – liiga vedelad segud valguvad printides laiali ja raskema

töödeldavusega segud jäävad printimise ajal pumpa kinni. Sellest tulenevalt on segu tähises täht „v“ ja „e“, mille selgitus on välja toodud 1.7 peatükis.

Katse läbiviimiseks läheb vaja:

- Hobarti segistit (vähemalt 1,5 liitri segu valmistamiseks);
- niisket lappi;
- kaussi segamiseks;
- kaal täpsusega 0,01g;
- tihendamispulka;
- kella või stopperit;
- raputuslauda;
- tüvikoonuselist vormi, mis vastab EVS-EN 1015-3:2004+A2:2007 standardi nõuetele, punkt 4.2.
- kellut või pahtlilabidat,
- nihikut, täpsusega 1 mm.

Vastava betooni retsepti koostisosad kaalutakse ja doseeritakse hoolikalt segamisanumasse ning segatakse kuivalt 2 min jooksul. Seejärel lisatakse niisutatud segamisanumasse (niiske lapiga niisutatud) vesi ning seejärel kuivsegu. Segu segatakse ühtlasel kiirusel segumasinaga 30 sekundit. Pärast segamist kraabitakse segamisanuma seintelt ja põhjast segu ja segatakse veel 30 sekundit segumasinaga. Kõik tööriistad ja pinnad tuleb eelnevalt niisutada niiske lapiga. Märgsegu segatakse lusikaga läbi ning täidetakse tüvikoonus kahes kihis. Esimene kiht ulatub poole tüvikoonuse kõrguseni ja tihendatakse 10 löögiga, kasutades selleks tihendamispulka. Seejärel lisatakse teine kiht segu tüvikoonuse ääreni ja tihendatakse 10 löögiga tihendamispulgaga. Segu tasandatakse tüvikoonuse äärega tasa ning üleliigne segu lõigatakse pahtlilabida või kelluga ära. Koonus eemaldatakse vertikaalsuunas reipalt, kuid ettevaatlikult. Sooritatakse raputuslual 10 lööki konstantse kiirusega üks löök sekundis [27]. Laiali valgunud segu mõõdetakse nihikuga ja tulemus kantakse tabelisse.

2.4.2 Tsemendiga betoonisegude retseptid ja vajumid raputuslaual

Tabel 2.4.2.1 Tsemendiga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		T10e				T10v			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		40,0 L	60,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM I 42,5 N	3100	50,0%	19,00 kg	6,129 L	642	50,0%	20,00 kg	6,452 L	645
Purustatud silikaat	2000	10,0%	3,80 kg	1,900 L	128	10,0%	4,00 kg	2,000 L	129
0-0,5 liiv	2650	50,6%	19,228 kg	7,256 L	649	50,6%	20,240 kg	7,638 L	653
0,5-1,2 liiv	2650	39,4%	14,972 kg	5,650 L	506	39,4%	15,760 kg	5,947 L	508
Vesi kuivaine järgi	1000	15,20%	8,664 kg	8,664 L	293	14,95%	8,970 kg	8,970 L	289
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,128	0,02%	4,00 g	0,008 L	0,129
Vajum raputuslaual, mm			156,0 mm				154,0 mm		

Tabel 2.4.2.2 Tsemendiga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		T10ef				T10vf			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM I 42,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	627	50,0%	19,000 kg	6,129 L	609
Purustatud silikaat	2000	25,0%	9,500 kg	4,750 L	313	25,0%	9,500 kg	4,750 L	304
0-0,5 liiv	2650	44,8%	17,024 kg	6,424 L	562	44,8%	17,024 kg	6,424 L	545
0,5-1,2 liiv	2650	30,2%	11,476 kg	4,331 L	379	30,2%	11,476 kg	4,331 L	368
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	286	16,8%	9,576 kg	9,576 L	307
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,125	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,122
Vajum raputuslual, mm		124,0 mm				151,0 mm			

Tabel 2.4.2.3 Tsemendiga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		T25e				T25v			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM I 42,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	641	50,0%	19,000 kg	6,129 L	639
Purustatud silikaat	2000	10,0%	3,800 kg	1,900 L	128	10,0%	3,800 kg	1,900 L	128
0-0,5 liiv	2650	50,6%	19,228 kg	7,256 L	648	50,6%	19,228 kg	7,256 L	647
0,5-1,2 liiv	2650	39,4%	14,972 kg	5,650 L	505	39,4%	14,972 kg	5,650 L	504
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	292	15,3%	8,721 kg	8,721 L	293
Fiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,961	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,959
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,128	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,128
Vajum raputuslual, mm		140,0 mm				146,0 mm			

Tabel 2.4.2.4 Tsemendiga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		T25ef				T25vf			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM I 42,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	626	50,0%	19,000 kg	6,129 L	614
Purustatud silikaat	2000	25,0%	9,500 kg	4,750 L	313	25,0%	9,500 kg	4,750 L	307
0-0,5 liiv	2650	44,8%	17,024 kg	6,424 L	561	44,8%	17,024 kg	6,424 L	550
0,5-1,2 liiv	2650	30,2%	11,476 kg	4,331 L	378	30,2%	11,476 kg	4,331 L	371
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	285	16,2%	9,234 kg	9,234 L	299
Fiiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,939	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,921
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,125	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,123
Vajum raputuslual, mm	122,0 mm					151,0 mm			

Tabel 2.4.2.5 Tsemendiga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		T01v			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM I 42,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	651
0-0,5 liiv	2650	66,7%	25,346 kg	9,565 L	868
0,5-1,2 liiv	2650	33,3%	12,654 kg	4,775 L	433
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	297
Fiiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,976
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,130
Vajum raputuslual, mm	150,0 mm				

2.4.3 Põletatud põlevkiviga betoonisegude retseptid ja vajumid raputuslaual

Tabel 2.4.3.1 Põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		P10e				P10v			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
Põletatud põlevkivi		50,0%	19,000 kg	6,333 L	597	50,0%	19,000 kg	6,333 L	595
Purustatud silikaat	2000	10,0%	3,800 kg	1,900 L	119	10,0%	3,800 kg	1,900 L	119
0-0,5 liiv	2650	50,6%	19,228 kg	7,256 L	605	50,6%	19,228 kg	7,256 L	602
0,5-1,2 liiv	2650	39,4%	14,972 kg	5,650 L	471	39,4%	14,972 kg	5,650 L	469
Vesi kuivaine järgi	1000	18,7%	10,659 kg	10,659 L	335	18,9%	10,773 kg	10,773 L	338
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,119	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,119
Vajum raputuslaual, mm		143,0 mm				150,0 mm			

Tabel 2.4.3.2 Põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		P10ef				P01e			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
Põletatud põlevkivi		50,0%	19,000 kg	6,333 L	585	50,0%	19,000 kg	6,333 L	
Purustatud silikaat	2000	25,0%	9,500 kg	4,750 L	292				
0-0,5 liiv	2650	44,8%	17,024 kg	6,424 L	524	66,7%	25,346 kg	9,565 L	864
0,5-1,2 liiv	2650	30,2%	11,476 kg	4,331 L	353	33,3%	12,654 kg	4,775 L	431
Vesi kuivaine järgi	1000	18,7%	10,659 kg	10,659 L	328	15,2%	8,664 kg	8,664 L	295
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,117	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,129
Vajum raputuslaual, mm		151,0 mm				103,0 mm			

Tabel 2.4.3.3 Põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		P01v				P25e			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
Põletatud põlevkivi		50,0%	19,000 kg	6,333 L		50,0%	19,000 kg	6,333 L	596
Purustatud silikaat	2000	0				10,0%	3,800 kg	1,900 L	119
0-0,5 liiv	2650	66,7%	25,346 kg	9,565 L	809	50,6%	19,228 kg	7,256 L	603
0,5-1,2 liiv	2650	33,3%	12,654 kg	4,775 L	404	39,4%	14,972 kg	5,650 L	470
Vesi kuivaine järgi	1000	18,7%	10,659 kg	10,659 L	340	18,7%	10,659 kg	10,659 L	335
Fiiiber	500	0,00%	0,00 g	0,000 L	0,000	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,894
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,121	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,119
Vajum raputuslaual, mm		149,0 mm				135,5 mm			

Tabel 2.4.3.4 Põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni retseptid.

Retsepti nimetus:		P25v				P25ef			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
Põletatud põlevkivi		50,0%	19,000 kg	6,333 L	593	50,0%	19,000 kg	6,333 L	584
Purustatud silikaat	2000	10,0%	3,800 kg	1,900 L	119	25,0%	9,500 kg	4,750 L	292
0-0,5 liiv	2650	50,6%	19,228 kg	7,256 L	600	44,8%	17,024 kg	6,424 L	523
0,5-1,2 liiv	2650	39,4%	14,972 kg	5,650 L	467	30,2%	11,476 kg	4,331 L	352
Vesi kuivaine järgi	1000	19,0%	10,830 kg	10,830 L	338	18,7%	10,659 kg	10,659 L	327
Fiiiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,890	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,875
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,119	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,117
Vajum raputuslaual, mm		145,9 mm				137,5 mm			

Tabel 2.4.3.5 Põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni retsept.

Retsepti nimetus:		P25vf			
Kogus:		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
Põletatud põlevkivi		50,0%	19,000 kg	6,333 L	579
Purustatud silikaat	2000	25,0%	9,500 kg	4,750 L	290
0-0,5 liiv	2650	44,8%	17,024 kg	6,424 L	519
0,5-1,2 liiv	2650	30,2%	11,476 kg	4,331 L	350
Vesi kuivaine järgi	1000	19,1%	10,887 kg	10,887 L	332
Fiiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,869
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,116
Vajum raputuslaual, mm		148,0 mm			

2.5 Betoonisegude valmistamise protsess

2.5.1 Koostisosade kaalumine

Betoonisegude koostisosad kaaluti kaaluga, mille skaala jaotis oli 0,1 grammi. Betoonisegude lisandid – superplastifikaator ja polüpropüleenfiiber – kaaluti kaaluga, mille täpsus oli 0,01 grammi. Anuma massi nulliti eelnevalt kaalul ära ja seejärel lisati materjal. Vee kaalumise puhul anum niisutati eelnevalt niiske lapiga.

2.5.2 Kuivsegude valmistamine

Kuivsegude segamiseks kasutati Soroto 40L-30 betoonisegistit. Esmalt lisati jämeliiv, seejärel peenliiv, sideaine (sõltuvalt segu retseptist oli selleks tsement CEM I 42 N või põletatud põlevkivi) ning seejärel lisandid (sõltuvalt retseptuurist lisati polüpropüleenfiibrit ning superplastifikaatorit). Poolik kuivsegu segati 5 minuti jooksul kuivalt ja seejärel lisati purustatud ja läbisõelatud silikaatkivi ning segati veel 5 minutit. Purustatud ja läbisõelatud silikaatkivi lisati hiljem, vältimaks selle liigset lagunemist peenemateks osakesteks.

2.5.3 Märgsegude valmistamine

Retseptidele, kus sideaineks oli tsement, lisati vesi kuivsegudele ja märgsegu segati 10 minutit.

Retseptid, kus sideaineks oli põletatud põlevkivi, lisati vesi kuivsegudele ja segati määrgsegu 10 minutit segistis ja 10 minutit segumikseriga. Oluliseks probleemiks oli põletatud põlevkiviga retseptide puhul segu halb segunemine Soroto 40L-30 betoonisegistis. Pärast 10 minutit betoonisegistis segamist jäi umbes 30% täitematerjalist seinte külge kinni ja segu oli tükjas. Segu paremaks homogeniseerimiseks valati segu betoonisegistist niisutatud anumasse ja segati eelnevalt niisutatud segumikseriga homogeenseks massiks 10 minuti jooksul.

2.5.4 Segude tihendamine ja vormimine

Survekatsekehade nimimõõtmed olid 100 mm x 100 mm x 100 mm. Üks vorm mahutas kaks katsekeha. Iga retsepti kohta tehti 24 katsekeha ehk kasutati 12 vormi. Vormid õlitati eelnevalt raketiseõliga õhukeses kihis kasutades selleks pintsli. Enne vormide täitmist keerati vormid tagurpidi, et liigne õli valguks vormidest välja. Survekatsekehade vormidesse lisati kelluga järk järgult ühtlaselt segunenud määrgsegu ning seejärel tihendati vibrolaual. Tihendamisel juhitud standardist „EVS-EN 12350-6:2019. Betoonisegu katsetamine. Osa 6: Tihedus. Alapeatükk 7.4.2.2 – tihendamine vibrolaual“. Vormitud katsekehad vibreeriti vibrolaual 5-15 sekundit peamiselt jälgides, et suuremad õhumullid kaoksid segust. Seejärel paigutati vormid tasasele pinnale ja terasspaatliga eemaldati üleliigne segu pinnalt ehk katsekeha siluti tasaseks vormi pinnaga [28]. Vormid kaeti kilega ja jäeti 24 tunniks tarduma. Pärast 24 tundi võeti katsekehad suruõhku kasutades vormidest välja.

Paindekatsekehade nimimõõtmed olid 40 mm x 40 mm x 160 mm. Ühes paindekatsekehade vormis paiknes kolm katsekeha. Vormid õlitati eelnevalt raketiseõliga õhukeses kihis pintsli kasutades. Enne vormide täitmist keerati vormid tagurpidi, et liigne õli valguks vormidest välja. Tihendamisel juhitud standardist „EVS-EN 12350-6:2019. Betoonisegu katsetamine. Osa 6: Tihedus. Alapeatükk 7.4.3 – käsitsi tihendamine tihendamisvarda või -pulgaga“. Tihendamiseks kasutati tihendamispulka. Tihendamine toimus kolmes kihis ning tüüplöökide arv oli standardist tulenevalt 25 lööki kihi kohta. Esimene kiht tihendati vormi põhjani ja järgmised kihid eelmise kihini. Pealne pind siluti tasaseks kasutades selleks terasspaatli [28]. Vormid kaeti kilega ja jäeti 24 tunniks tarduma. Pärast 24 tunni möödumist koputati vorme ettevaatlikult ning võeti katsekehad välja. Oluline on jälgida vormide komplekte, sest kui detailid lähevad vahetusse, ei pruugi vormid uuesti täpselt kokku sobida.

Tõmbekatsekehade valmistamiseks kasutati kaheksa-kujulisi vorme. Metallvormide puudusel lõigati kuumtraadi lõikuri abil XPS materjalist juurde täiendavaid vorme. Vormid eelnevalt õlitati raketiseõliga õhukeses kihis pintsli. Enne vormide täitmist keerati vormid tagurpidi, et üleliigne õli valguks vormidest välja.

Vormid asetati kile peale, mis samuti eelnevalt õlitati õhukeses kihis. Tihendamisel juhinduti standardist „EVS-EN 12350-6:2019. Betoonisegu katsetamine. Osa 6: Tihedus. Alapeatükk 7.4.3 – käsitsi tihendamine tihendamisvarda või -pulgaga “. Tihendamiseks kasutati tihendispulka. Tihendamine toimus kolmes kihis ning tüüplöökide arv oli standardist tulenevalt 25 lööki kihi kohta. Esimene kiht tihendati vormi põhjani, ja järgmised kihid eelmise kihini. Pealmine pind siluti tasaseks terasspaatlit kasutades [28]. Vormid kaeti kilega ja jäeti 24 tunniks tarduma. Pärast 24 tunni möödumist koputati vorme ettevaatlikult ning võeti katsekehad välja.

2.6 Katsekehade hoiustamise tingimused

Kõik katsekehad tähistati pärast vormidest välja võtmist hariliku pliitsi või rasvakriidiga ja paigutati veega täidetud anumatesse kivistuma. Anumad paiknesid põrandal ruumi temperatuuril $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

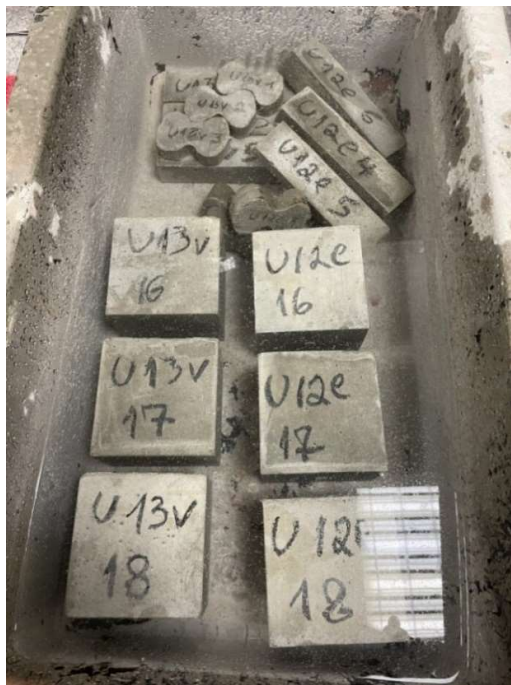


Foto 3. Katsekehade hoiustamine veevannis. Foto autori erakogust.

2.7 Katsekehade katsetamine

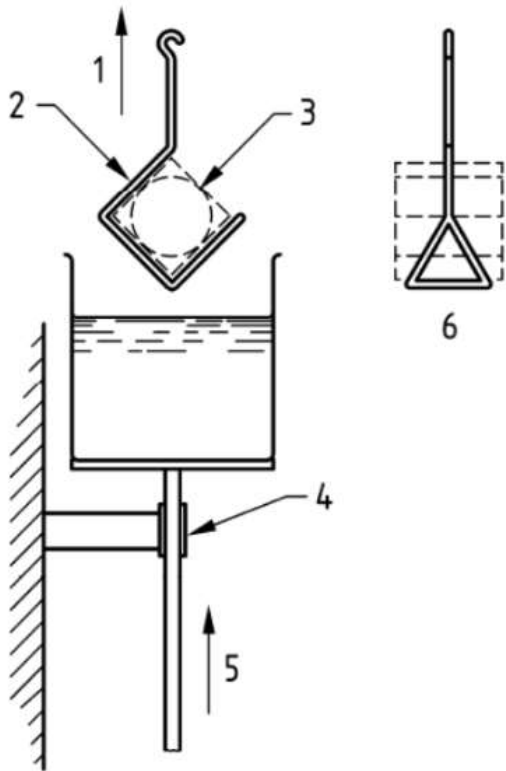
2.7.1 Kivistunud betooni tiheduse määramine

Kivistunud katsekehade tiheduse määramisel lähtuti standardist „EVS-EN 12390-7:2009. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 7: Kivistunud betooni tihedus“ [29]. Tiheduse määramiseks üleslükkejõu meetodil kaalutakse katsekehad vees vabalt rippudes selliselt, et katsekeha jääb tervenisti vee alla, kuid ei puuduta anumat. Seejärel võetakse katsekeha veest välja, kuivatatakse pindmine vesi rätikuga ja kaalutakse uuesti kuivalt. Tulemused registreeritakse tabelisse.

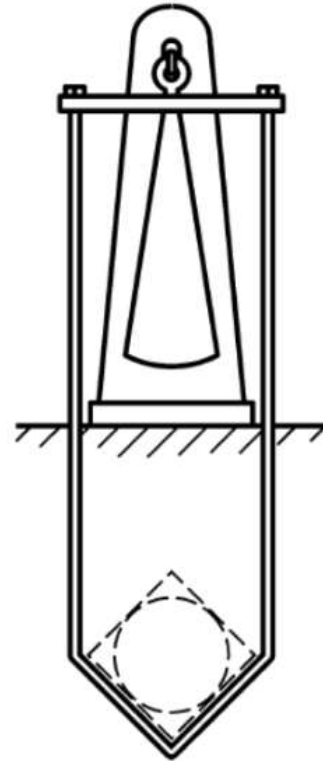
Katsekehade ruumala arvutatakse standardis toodud valemiga [29]:

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w}$$

kus V on katsekeha ruumala (ühik m^3), m_a on katsekeha mass õhus (ühik kg), m_{st} on uputatud rippuv näiv mass (ühik kg), m_w on uputatud katsekeha näiv mass (ühik kg) ja ρ_w on vee tihedus temperatuuril $20 \pm 5^\circ C$. [29]



a) kaalumehhanismi alla kinnitav riputi



b) alternatiivne riputi, mis kinnitatakse kaalumehhanismi kohale

Skeem 1 standardist „EVS-EN 12390-7:2009. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 7: Kivistunud betooni tihedus“ [29].

Tiheduse arvutamiseks kasutati valemit [29]:

$$D = \frac{m}{V}$$

kus D on tihedus (ühik kg/m^3), m on katsekeha mass (ühik kg) ja V on katsekeha ruumala (ühik m^3). [29]



Foto 1. Kuubi kaalumine vees. Foto autori erakogust.



Foto 2. Kuubi kaalumine õhus. Foto autori erakogust:

2.7.2 Survekatse

Survekatsekehade mõõtmed vormide põhjal olid 100 mm x 100 mm x 100 mm. Katsekehad peavad vastama nõuetele, mis on välja toodud standardites EN 12350-1; EN 12390-1, EN 12390-2 või 12504-1[30]. Katsekehade kõrgus mõõdeti üle elektroonilise nihikuga, mille skaala jaotis oli 0,01 mm. Katsekehade survekatse tegemisel lähtuti standardist „EVS-EN 12390-3:2019. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus“. Standardi kohaselt läheb katsetamiseks vaja:

- 1) Survekatsemasinat, mis vastab standardile EN 12390-4 [30].

Survekatsel katsetati katsekehasid, mille vanus oli: 3 päeva, 7 päeva, 14 päeva, 28 päeva ja 56 päeva. Igas uuritud vanuses katsetati 3 katsekeha ühe retsepti kohta.

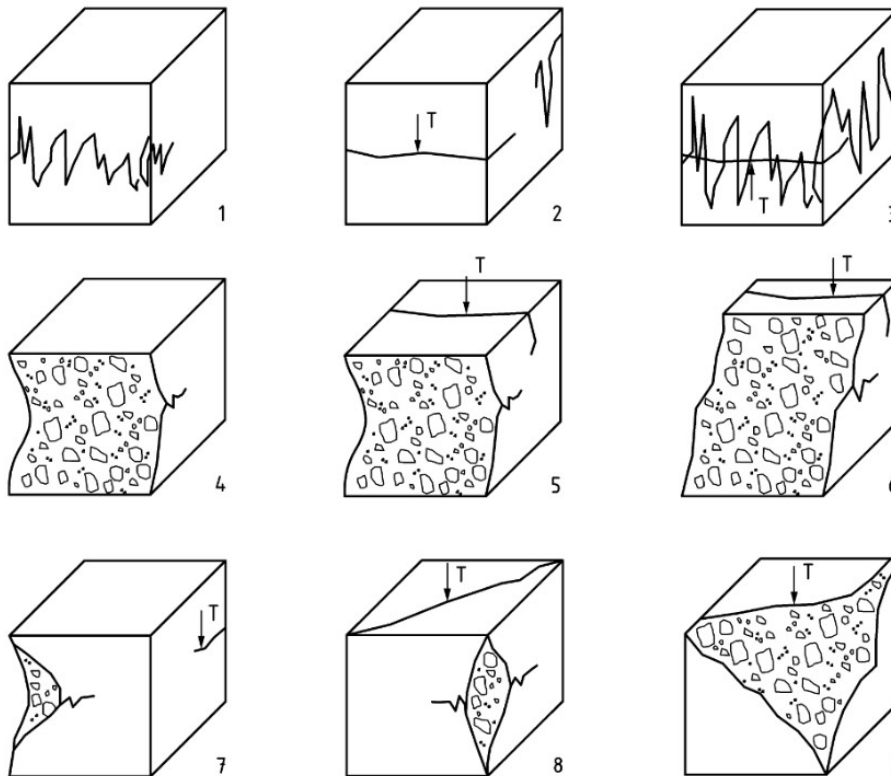
Katsekeha tuleb tsentreeritult asetada survepressi plaatide vahele – tsentreerimise täpsus peab olema 1% kuubi valitud nimimõõdust, s.o 1 mm [30]. Katsekehasid tuleb tulenevalt standardis toodud juhiste kohaselt katsetada mitte hiljem kui 10 tundi pärast kivistamise keskkonnast välja võtmist [30]. Katseseadmed asusid

samas ruumis, kus katsekehi hoiustati – temperatuur vastas standardis nõutud vahemikule $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Koormamine viidi läbi ühtlase kiirusega. [30].

Tulemuse arvutamiseks kasutati standardis „EVS-EN 12390-3:2019. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus” välja toodud valemist peatükist 8 [30]:

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

Kus f_c on survetugevus (ühik N/mm^2 või MPa), F on suurim koormus (ühik N) ja A_c on ristlõike pindala, millele surve mõjub (mm^2).



Joonis 1 standardist „EVS-EN 12390-3:2019. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus”. Kuubi rahuldavad purunemispildid. [30]



Foto 4. Survekatse teostamine pressiga. Foto autori erakogust.

2.7.3 Paindetugevuse katse

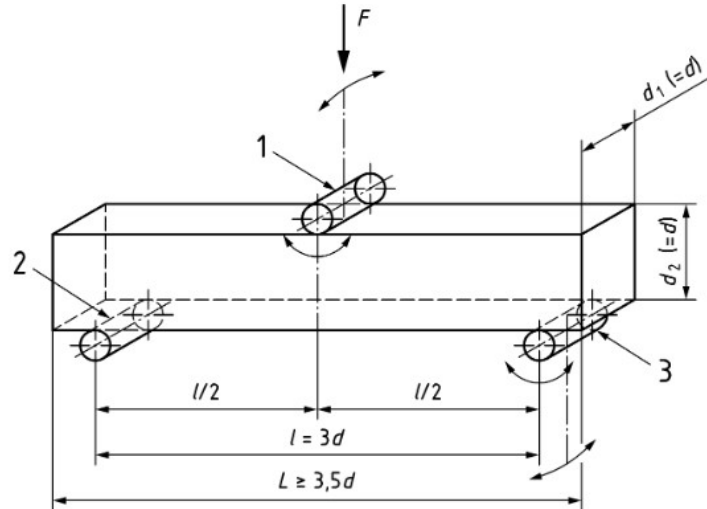
Paindetugevuse katsekehade nimimõõtmed olid 160 mm x 40 mm x 40 mm. Katsekehade pikkus, laius ja kõrgus mõõdeti üle elektroonilise nihikuga, mille skaala jaotis oli 0,01 mm. Paindetugevuse katse läbiviimisel lähtuti standardist „EVS-EN 12390-5:2019. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus“. Standardi kohaselt läheb katsetamiseks vaja:

- 1) Paindekatsemasinat, mis vastab standardile EN 12390-4 [31].

Katsekehade purustamiseks kasutatud paindekatsemasin ei vasta täielikult standardile EN 12390-4 – katseseadmel kõik toed on jäigad.

Paindekatsel katsetati katsekehasid, mille vanus oli: 7 päeva, 28 päeva ja 56 päeva. Igast päevade seeriast katsetati 3 katsekeha ühe retsepti kohta.

Katsekeha asetatakse silindrilisele toepinnale, üleval asetsevad koormamisrull.



Skeem katsekeha koormamisest vastavalt standardile „EVS-EN 12390-5:2019. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus“. [31]

Katsekehasid tuleb tulenevalt standardis toodud juhistest katsetada mitte hiljem kui 10 tundi pärast kivistamise keskkonnast välja võtmist [31]. Katseadmed asuvad samas ruumis, kus olid ka katsekehad hoiustatud – temperatuur vastab standardis nõutud vahemikule $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Koormamine peab olema ühtlase kiirusega. Koormamine toimub seni, kuni katsekeha puruneb ja koormus hakkab vähenema.

Paindetõmbetugevus on välja arvatud standardikohase valemiga [31]:

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

Kus $f_{ct,fl}$ on paindetõmbetugevus (ühik on MPa), F on purustav jõud (ühik on N), l on katsekeha alumiste tugede vahekaugus millimeetrites ja d_1 ja d_2 on katsekehade ristlõike mõõtmed millimeetrites. [31]



Foto 6. Paindekatskehade katsetamine pressiga. Foto autori erakogust.

2.7.4 Nakkekatse

Betooni nakkekatse (inglise keeles „*pull-off*“ katse) läbiviimisel lähtuti standardist „EVS-EN 1015-12:2004 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 12: Kivistunud krohvimördi aluspinna nakketugevuse määramine“. Kuna 3D printitava betoonisegu retseptide fraktsioonid on väikesed, siis standardi kohaselt on tegemist mördiga ja sellest tulenevalt on võetud aluseks mördi standard.

Katse läbiviimiseks vajalikud vahendid [32]:

- 1) epoksiidliim,
- 2) ketaslõikur,
- 3) teemantpuurimispea (silinderpuurimispea) kuivlõikamiseks läbimõõduga 50 mm,
- 4) kaitseprillid,
- 5) respiraator,
- 6) silindrikujulised tõmbeplaadid läbimõõduga 50 mm,
- 7) suruõhukompressor,
- 8) puhur.

Katse läbiviimiseks kasutati survekatsekeha kuubikuid. Kuupi freesiti ringikujuline süvend teemantpuuriga 5-10 mm sügavusele. Kuna freesimise ajal eraldub palju lendlevat tolmu, oli vajalik kaitseprillide ja respiraatori kasutamine ning ruumi hea ventilatsioon. Katsekeha tuleb jämeda liivapaberiga üle lihvida, et pind karestada ja

eemaldada nõrk pealispind. Katsekeha tuleb seejärel puhastada suruõhuga üleliigsest tolmust ja jätta puhuri alla kuivama soovituslikult 12 tunniks, et liigne niiskus katsekeha pinnalt kuivaks välja. Pärast liigse niiskuse kuivatamist tuleb katsekehale liimida terasest silinder. Standardi järgi tuleb kasutada vaigupõhist liimi ehk epoksiidliimi või metüülmetakrülaadvaiku, selle lõputöö raames kasutati epoksiidliimi. Liim kanti silindrile ning seejärel paigaldati silinder katsekeha peale. Silindrit keerutati päripäeva ja vastupäeva 10 korda mõlemas suunas, et liim ühtlasemalt laiali ajada. Kasutatud epoksiidliim tardub 1 kuni 5 minutiga. Selleks, et vältida liimist purunemist, on mõistlik jätta liimitud katsekehad kivistuma kuni 12ks tunniks. [32]

Katsetamiseks kasutatakse tõmbekatse masinat. Masin peab vastama standardis „EVS-EN 1015-12:2004 Mürimörtide katsemeetodid. Osa 12: Kivistunud krohvimördi aluspinna nakketugevuse määramine“ nõuetele. Masin peab võimaldama rakendada jõudu tõmbeplaadile sedasi, et oleks välistatud paindemomenti teke. Koormus rakendatakse risti katsepinnale, pinge peab kasvama kiirusega 0,003 ... 0,1 MPa/s. [32]

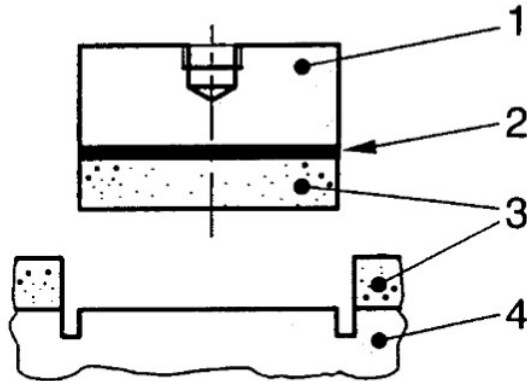
Standardi kohaselt katsekehade hoiustamine peab toimuma ruumis, milles on võimalik hoida temperatuuri $20 \pm 2^\circ\text{C}$. [32]

Nakketugevus arvutatakse valemiga [32]:

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

, kus f_u on nakketugevus (ühik N/mm^2 või MPa), A on ristlõike pindala (ühik mm^2) ja F_u on purustav jõud (ühik N) [32]. Katsekeha õnnestunud purunemist hinnatakse standardis toodud purunemispiltide järgi, mis on välja toodud peatükis 9.

Allpool on välja toodud purunemispiltide joonised standardist „EVS-EN 1015-12:2004 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 12: Kivistunud krohvimördi aluspinna nakketugevuse määramine“ peatükist 9 [32]:



Joonis 2 – purunemispilt a – nakkepurunemine – purunemine toimus mördi alusmaterjali kontaktpinnas. Katsetulemus võrdub nakketugevusega. [32]

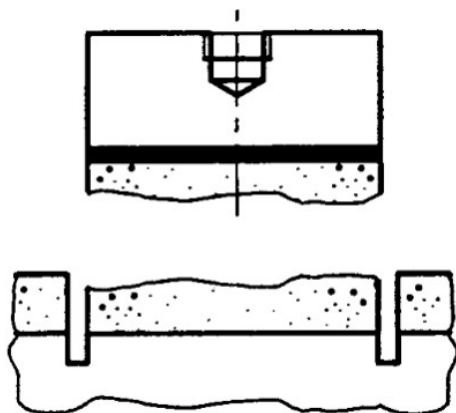
1 - silindrikujuline tõmbeplaat läbimõõduga 50 mm

2 - epoksiidliimi kiht

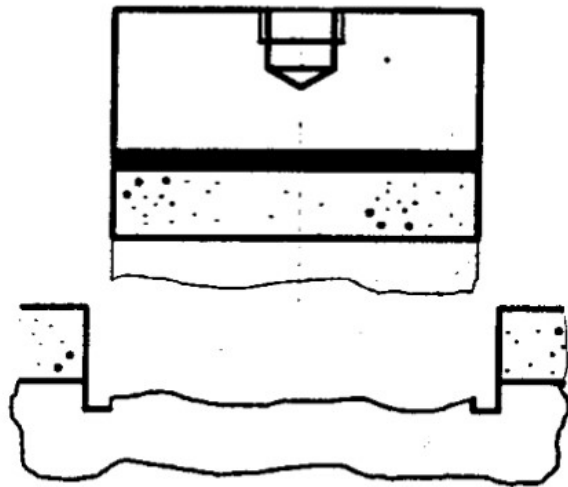
3 - mört

4 - alusmaterjal

Antud lõputöö raames betooni nakke katse puhul alusmaterjali kihti pole – selleks on mört.



Joonis 3 – purunemispilt b – kohesioonpurunemine – purunemine toimus mördis. Nakketugevus on katsetulemusest suurem. [32]



Joonis 4 – purunemispilt c – kohesioonpurunemine – purunemine toimus alusmaterjalis. Nakketugevus on katsetulemusest suurem. [32]



Foto 7. Epoksiidliimi kandmine metallsilindrile. Foto autori erakogust.



Foto 8. Katsekehade kuivatamine puhuriga. Foto autori erakogust.



Foto 9. Liimitud väljatõmbe katse katsekeha. Foto autori erakogust.



Foto 10. Väljatõmbekatse läbiviimine. Foto autori erakogust.

2.7.5 Tõmbekatse

Tõmbekatse aluseks võeti ASTM (inglise keeles täispikk nimetus „American Society for Testing and Materials“) standard C307: „Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing“[33]. Katsekehade valmistamiseks ja tõmbekatse läbiviimiseks vajalikud seadmed ja vahendid on:

- 1) tõmbekatsemasin,
- 2) kaheksakujulised vormid,
- 3) pitskruvid,
- 4) kile,
- 5) tihendamispulk,
- 6) pintsel,
- 7) raketiseõli.

Iga betooni retsepti jaoks valmistati 6 kaheksakujulist tõmbekatsekeha. 3 katsekeha katsetati 24 päeva vanuselt ja 3 katsekeha 56 päeva vanuselt. Katsekehade valmistamisel kasutati terasest ja ekstruuderpolüstüreenist lõigatud vorme. Vormid suruti tugevalt kinni pitskruvidega. Vormid pintseldati raketiseõliga üle ning asetati kilele. Vormid pöörati tagurpidi, et üleliigne õli välja valguks.

Tihendamisel juhinduti standardist „EVS-EN 12350-6:2019. Betoonisegu katsetamine. Osa 6: Tihedus. Alapeatükk 7.4.3 – käsitsi tihendamine tihendamisvarda või -pulgaga“. Tihendamiseks kasutati tihendamispulka. Tihendamine toimus kolmes kihis ning tüüplöökide arv oli standardist tulenevalt 25 lööki kihi kohta. Esimene kiht tihendati vormi põhjani, järgmised kihid eelmise kihini. Pealmine pind siluti tasaseks terasspaatli abil [28]. Vormid kaeti kilega ja jäeti 24 tunniks kivinema. Pärast 24 tunni möödumist koputati vorme ettevaatlikult ning võeti katsekehad välja. Vormist vabastatud katsekehad tõsteti vette kivinema.

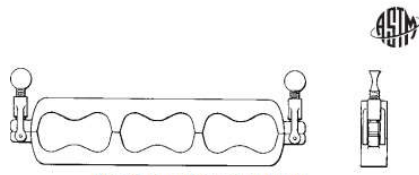
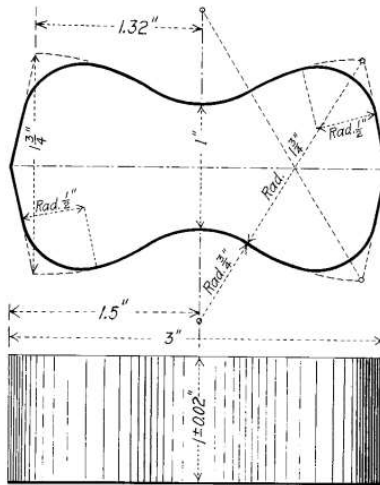


FIG. 1 Briquet Gang Mold



Skeem 1 standardist ASTM C307, kaheksakujuliste vormide kujutis. [33]



Foto 11. Purunenud tõmbekatsesehad. Foto autori erakogust.

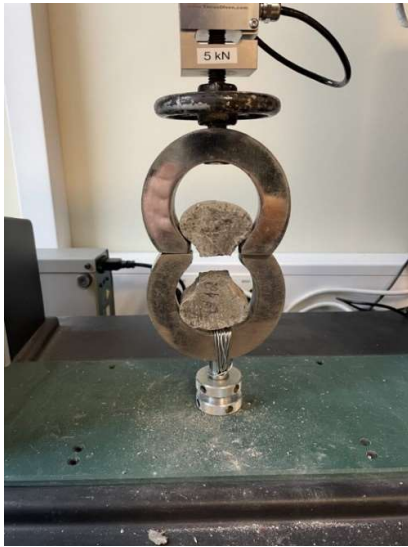


Foto 12. Kaheksa-kujulise tõmbekatsesekeha purunemine. Foto autori erakogust.

3 KATSETULEMUSTE ANALÜÜS

Katsetulemuste arvutamisel ja analüüsimisel on kasutatud vastava katsegrupi kuni kolme tulemuse keskmiseid väärtusi survetugevuse, paindetugevuse, nakketugevuse, tiheduse ja tõmbetugevuse puhul. Mainitud tugevusparameetri lubatud hälbeks keskmisest valiti 10%, see tähendab, tulemus hüljati kui erind juhul, kui see erines grupi keskmisest enam kui 10%. Sama loogikat kasutati ka keskmise tiheduse arvutamisel.

3.1 Batoon koos 10% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja tsemendiga

Võrreldakse betooniretsepte markeeringuga T01v, T10e, T10v, T10ef ja T10vf. Käsitletakse segusid, millesse lisati täitematerjalist 10% mahus purustatud silikaatkivi, polüpropüleenfiibrit ja ilma polüpropüleenfiibrita ning sideaineks kasutati tsementi CEM I 42,5 N.

3.1.1 Survetugevus

3 päeva vanusest seeriast retseptides, kus kasutati polüpropüleenfiibrit, on märkimisväärselt näha survetugevuse suurendamist kolmandal päeval – ehitusplatsi kontekstis see tähendab üldjuhul piisava survetugevuse saavutamist, et saaks ehitustöid jätkata. Võrreldes retseptiga, kus kasutati ainult tsementi, oli fiibriga retseptide survetugevus kolmandal päeval kuni 36% suurem.

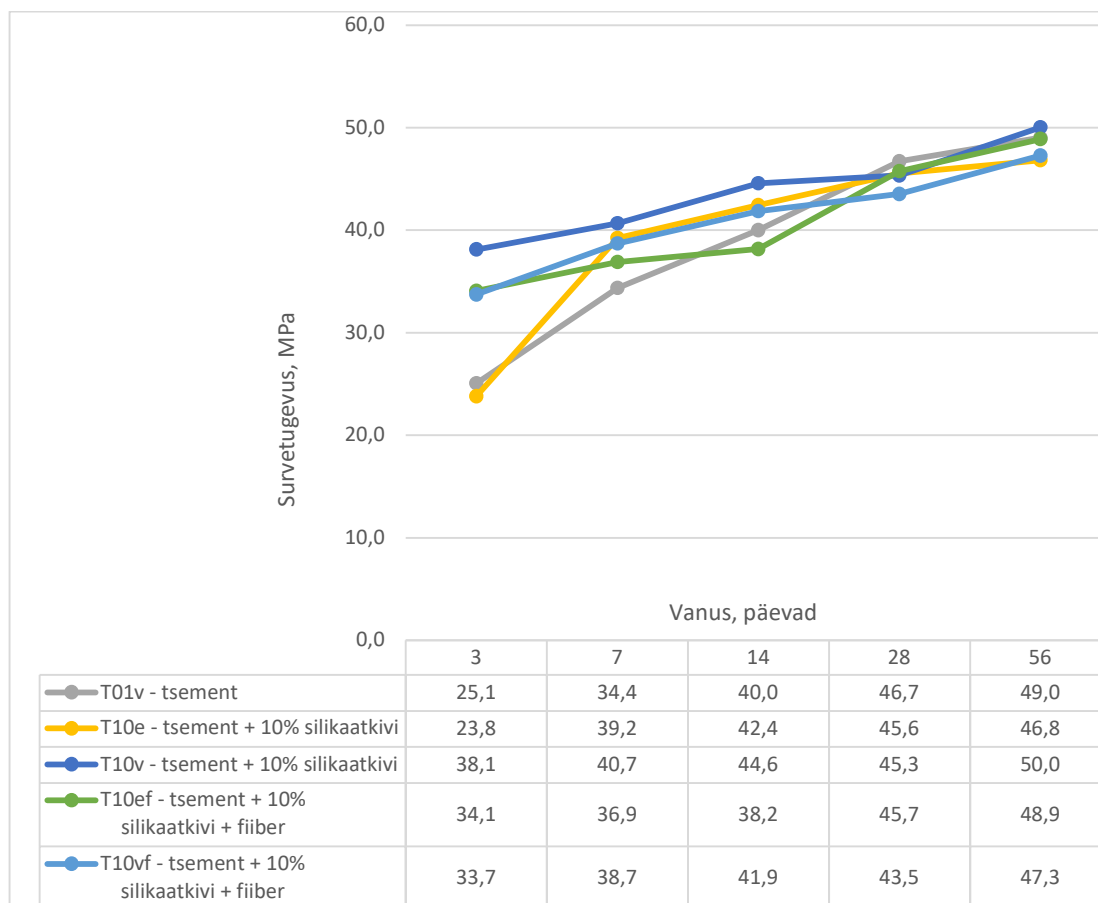
7 päeva vanusest seeriast retseptid, kus kasutati purustatud silikaatkivi ilma fiibrita, andsid kuni 18% suurema survetugevuse kui ainult tsemendiga retsept. Fiibriga retseptidel oli survetugevus 5% väiksem kui ilma fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptid.

14 päeva vanusest seeriast purustatud silikaatkiviga retseptide survetugevus on kuni 11% suurem võrreldes retseptiga, kus polnud purustatud silikaatkivi.

28 päeva vanusest seeriast on tugevaim retsept ilma purustatud silikaatkivita. Retsept on kõigest 2% tugevam kui fiibriga retseptid ja 3% tugevam kui purustatud silikaatkiviga retseptid.

Arvestades, et alaindeksiga „v” retseptid on parema töödeldavusega kui betooni retseptid alaindeksiga „e” siis on survetugevuse tulemused üpriski ühtlased 28 päeva vanuses.

56 päeva vanusest seeriast purustatud silikaatkiviga retsept on 2% tugevam kui tsemendiga retsept – vahe on kõigest 1 MPa.



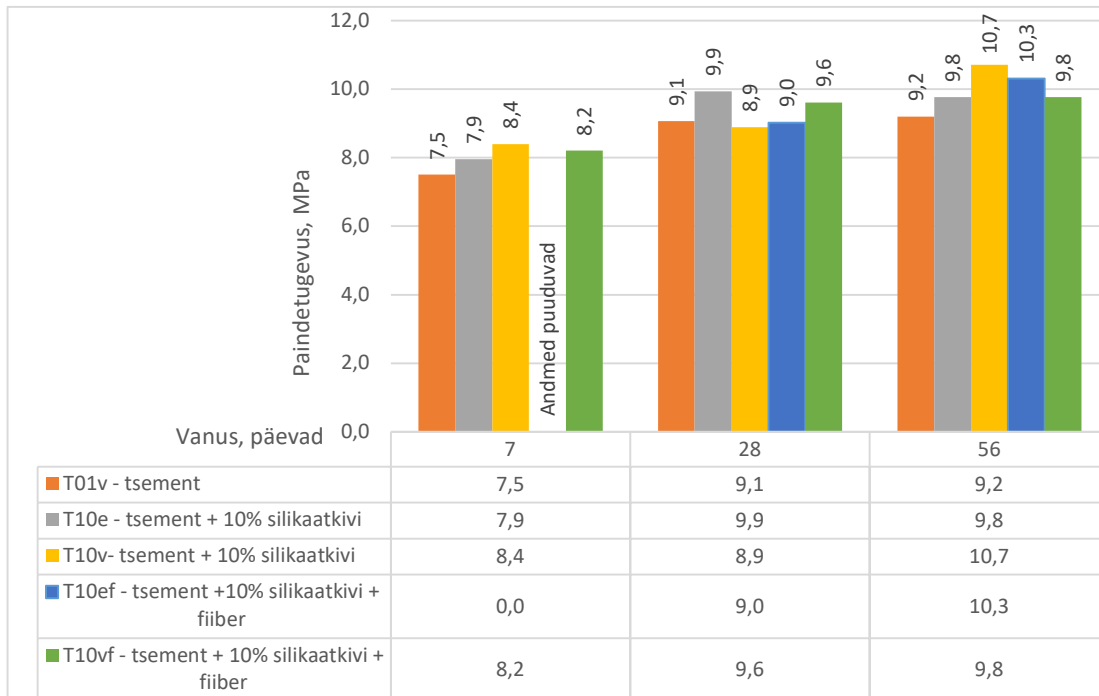
Graafik nr. 3.1.1.1. Betoonide survetugevused, milles kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

3.1.2 Paindetugevus

7 päeva vanusest seeriast on paindetugevus purustatud silikaatkiviga retseptidel kuni 12% suurem kui tsemendiga retseptil. Fiibriga retseptil oli paindetugevus suurem 9% võrreldes tsemendiga retseptiga.

28 päeva vanusest seeriast fiibriga retsept oli 8% suurema paindetugevusega kui tsemendiga retsept. Purustatud silikaatkiviga retseptid olid kuni 10% suurema paindetugevusega kui tsemendiga retsept.

56 päeva vanusest seeriast olid purustatud silikaatkiviga retseptid kuni 18% tugevamad, kui tsemendiga retsept. Saab järeldada, et purustatud silikaatkivi lisamine 10% täitematerjali kogumassist koos lisaveega suurendab paindetugevust nii 28 päeva kui ka 56 päeva vanuses.



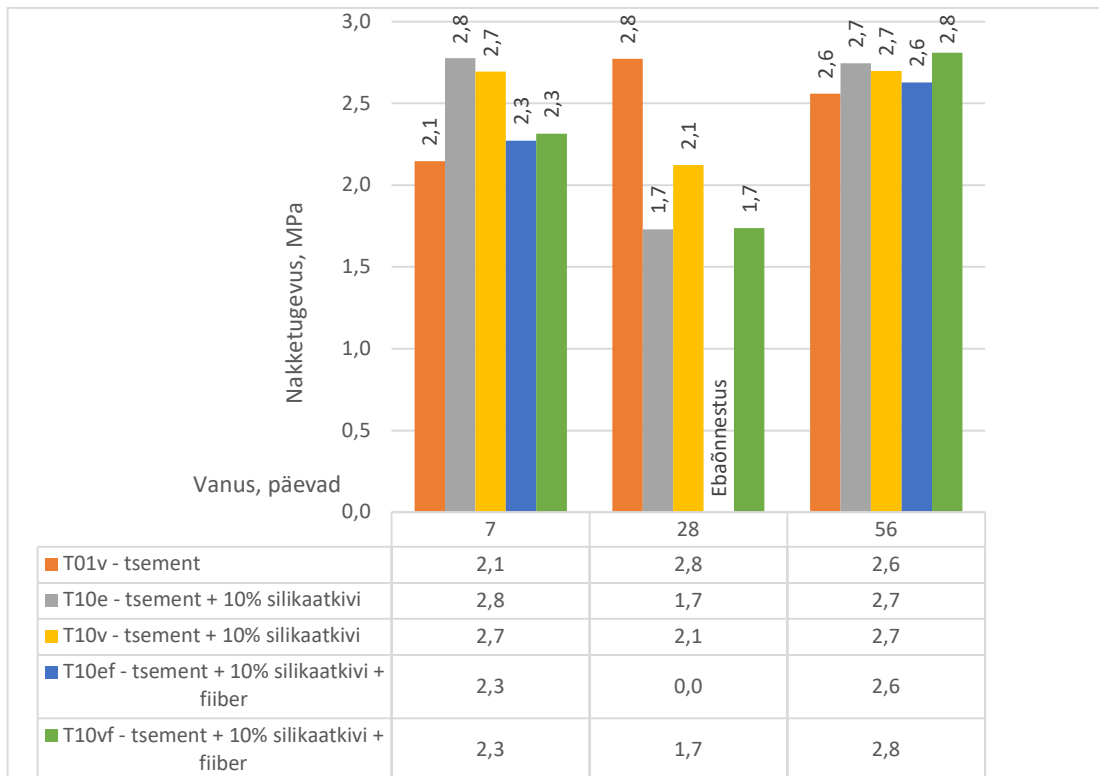
Graafik nr. 3.1.2.1. Betoonide paindetugevused, kus kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

3.1.3 Nakketugevus

7 päeva võrdluses andis purustatud silikaatkiviga retsept koos lisaveega 29% suurema nakketugevuse kui ainult tsemendiga retsept. Fiibriga retsept andis oluliselt vähem nakketugevust juurde – 8% võrreldes tsemendiga retseptiga.

28 päeva võrdluses on tsemendiga retsept kõige tugevam, purustatud silikaatkivi lisamine ja fiibri lisamine andsid väiksema nakketugevuse – purustatud silikaatkivi 23% nõrgema ja fiibriga 37% nõrgema nakketugevuse.

56 päeva võrdluses annab purustatud silikaatkivi 5% suurema nakketugevuse kui tsemendiga retsept ja fiibriga kuni 10% suurema nakketugevuse. Purustatud silikaatkivi kasutamisel tuleb nakketugevuse puhul arvestada, et 56. päeval on tugevus suurem kui 28. päeval, kuid nakketugevuse kasv on kõigest 5% ning küsimus tekib pigem, kas ehituse kalendergraafikusse jäetakse piisavalt aega, et oodata nakketugevuse saavutamist.

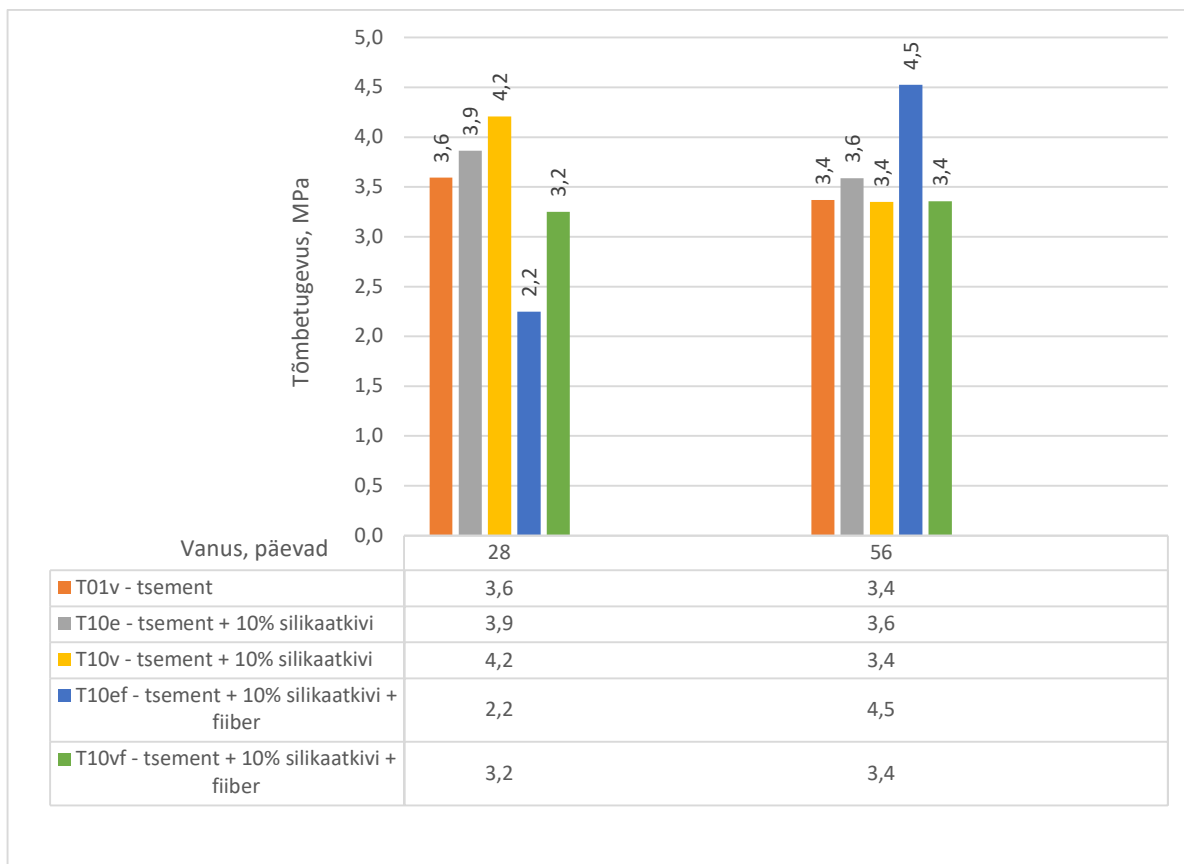


Graafik nr. 3.1.2.1. Betoonide nakketugevused, kus kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

3.1.4 Tõmbetugevus

28 päeva vanuste katsekehade keskmine tõmbetugevus on kuni 17% suurem purustatud silikaatkiviga retseptidel kui tsemendiga retseptil. Fiibri lisamine andis kuni 37% väiksema tõmbetugevuse võrreldes fiibriga retseptiga.

56 päeva vanuste katsekehade keskmine tõmbetugevus on purustatud silikaatkiviga retseptides kuni 7% suurema tõmbetugevusega kui tsemendiga retsept. Fiibri lisamine ilma lisaveeta annab kuni 34% suurema tõmbetugevuse. Vee lisamisel fiibriga retsepti annab sama tõmbetugevuse, mis purustatud silikaatkiviga lisaveega retsept. Saab järeldada, et fiibri lisamine tasub ära alles 56. päeval tõmbetugevuse võrdluse seisukohalt.



Graafik nr. 3.1.4.1. Betoonide tõmbetugevused, kus kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

3.2 Betoon koos 25% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja tsemendiga

Võrreldakse betooniretsepte markeeringuga T25e, T25v, T25ef ja T25vf. Käsitletakse segusid, kus lisati täitematerjalist 25% mahus purustatud silikaatkivi, polüpropüleenfiibrit ning sideaineks kasutati tsementi CEM I 42,5 N.

3.2.1 Survetugevus

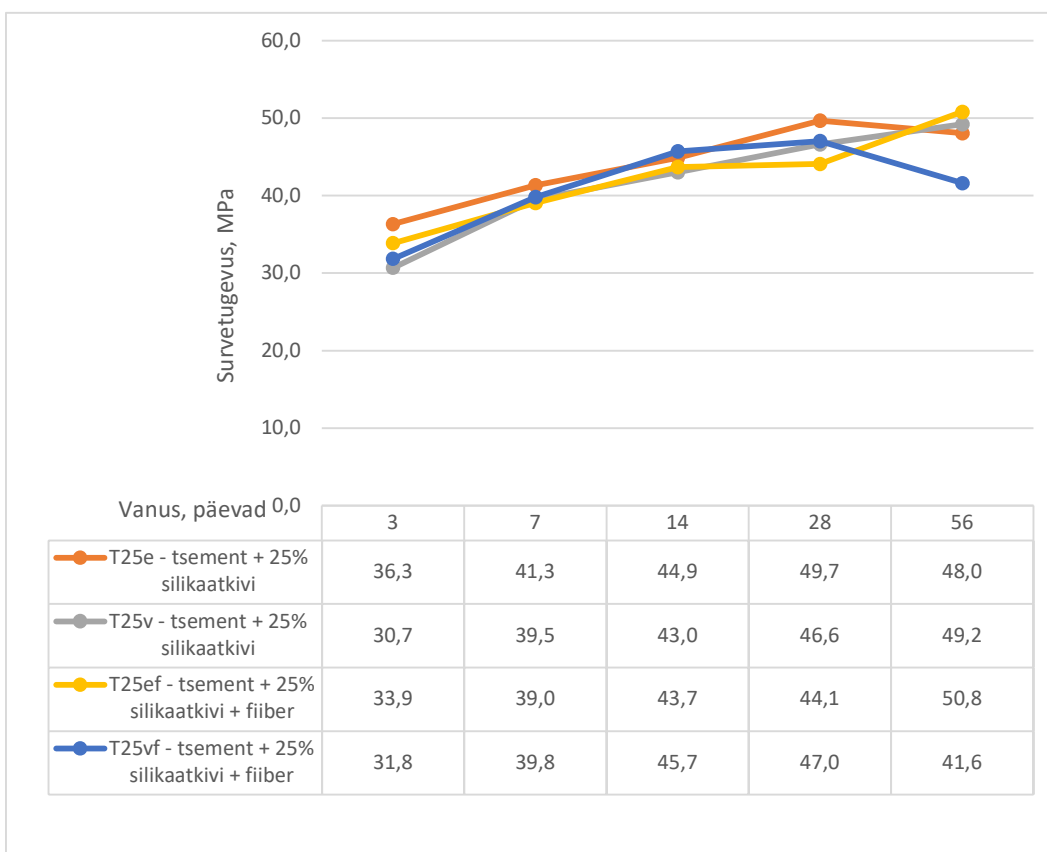
3 päeva vanusest seeriast purustatud silikaatkiviga peeneteraline betoon ilma lisaveeta andsid kuni 7% suurema survetugevuse kui lisaveeta fiibriga retsept. Lisaveega purustatud silikaatkiviga retsept oli 4% nõrgem kui fiibriga lisaveega retsept.

7 päeva vanusest seeriast on lisaveega purustatud silikaatkivi retsept 1% väiksem kui fiibriga lisaveega retsept. Lisaveeta purustatud silikaatkiviga retsept on aga 6% tugevam kui lisaveeta fiibriga retsept.

14 päeva vanusest seeriast lisaveega purustatud silikaatkiviga retsept on 6% väiksem kui lisaveega fiibriga retsept. Lisaveeta purustatud silikaatkiviga retsept on 3% suurema survetugevusega kui lisaveeta fiibriga retsept.

28 päeva vanusest seeriast lisaveega purustatud silikaatkivi retsept on endiselt väiksem kui fiibriga retsept.

56 päeva vanusest seeriast tugevaim on retsept fiibriga, kuhu pole lisatud lisavett. Survetugevus oli sellel retseptil 3% suurem kui lisaveega purustatud silikaatkiviga retseptil. 25% purustatud silikaatkivi lisamine pole niivõrd heade tulemustega kui 10% mahus purustatud silikaatkivi lisamine peeneteralise betooni valmistamisel, kuid 3D printitava betooni printimise seisukohalt on mõistlik lisada fiibrit.



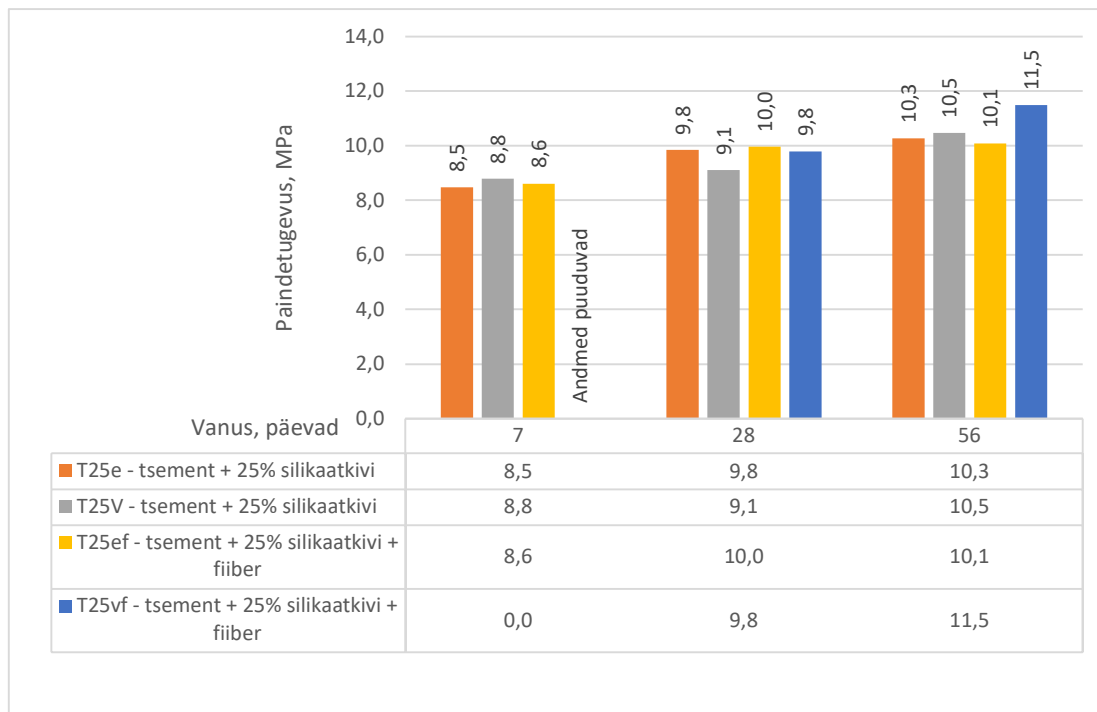
Graafik nr. 3.2.1.1. Betoonide survetugevused, kus kasutati 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

3.2.2 Paindetugevus

7 päeva vanusest seeriast paindetugevus on kuni 2% suurem purustatud silikaatkiviga retseptil kui fiibriga retseptil.

28 päeva vanusest seeriast fiibri lisamine annab kuni 9% suurema paindetugevuse kui fiibrita retseptid, aga seejuures tuleb fiibrile lisavett lisada. Kui purustatud silikaatkivile lisavett mitte lisada, siis on fiibriga retsept vaid 1% võrra suurema tugevusega.

56 päeva vanusest seeriast fiibriga retsept on kuni 12% suurema paindetugevusega kui fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptid. 25% mahus täitematerjali kogumassist fiibri lisamine annab paindetugevusele juurde 12%.



Graafik nr. 3.2.2.1. Betoonide paindetugevused, kus kasutati 25% täitematerjali massist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

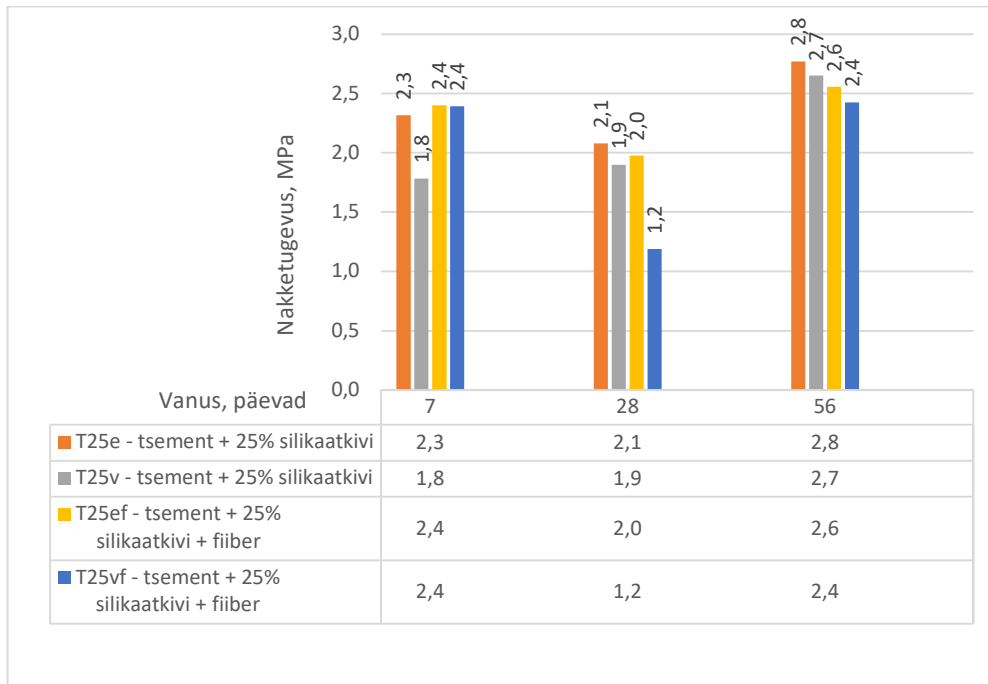
3.2.3 Nakketugevus

7 päeva võrdluses on fiibriga lisaveega retsept 26% suurema nakketugevusega kui ilma fiibrita lisaveega retsept.

28 päeva võrdluses toimub fiibriga retseptidel nakketugevuse langus, eriti märgatav on see lisaveega fiibriga retseptil, mis on võrreldes lisaveega purustatud silikaatkiviga retseptiga lausa 60%. Ilma fiibrita lisaga retsepti nakketugevus kasvas 8% võrra.

56 päeva võrdluses on lisaveega purustatud silikaatkiviga peeneteralise betooniresepti nakketugevus suurem 9% võrra kui fiibriga ja lisaveega retsepti

nakketugevus. Fiibri lisamine pole seega nii hea nakketugevuse seisukohalt, kuid paindetugevuse ja survetugevuse seisukohalt on tasuv. 28 päeva pealt kasvas lisaveega purustatud silikaatkiviga retsepti nakketugevus 28% võrra. Nagu ka peeneteralise betooni puhul, kus täitematerjali kogumassist oli 10% mahus lisatud purustatud silikaatkivi, on näha üldpildis langust 28 päeva vanustel katsekehadel ja 56. päeval tugevus uuesti kasvab umbes samale tasemele või kõrgemale kui 7 päevastel katsekehadel. Ilma fiibrita retseptid tulid suurema nakketugevusega kui fiibriga retseptid 56 päeva vanuste katsekehade võrdluse põhjal.

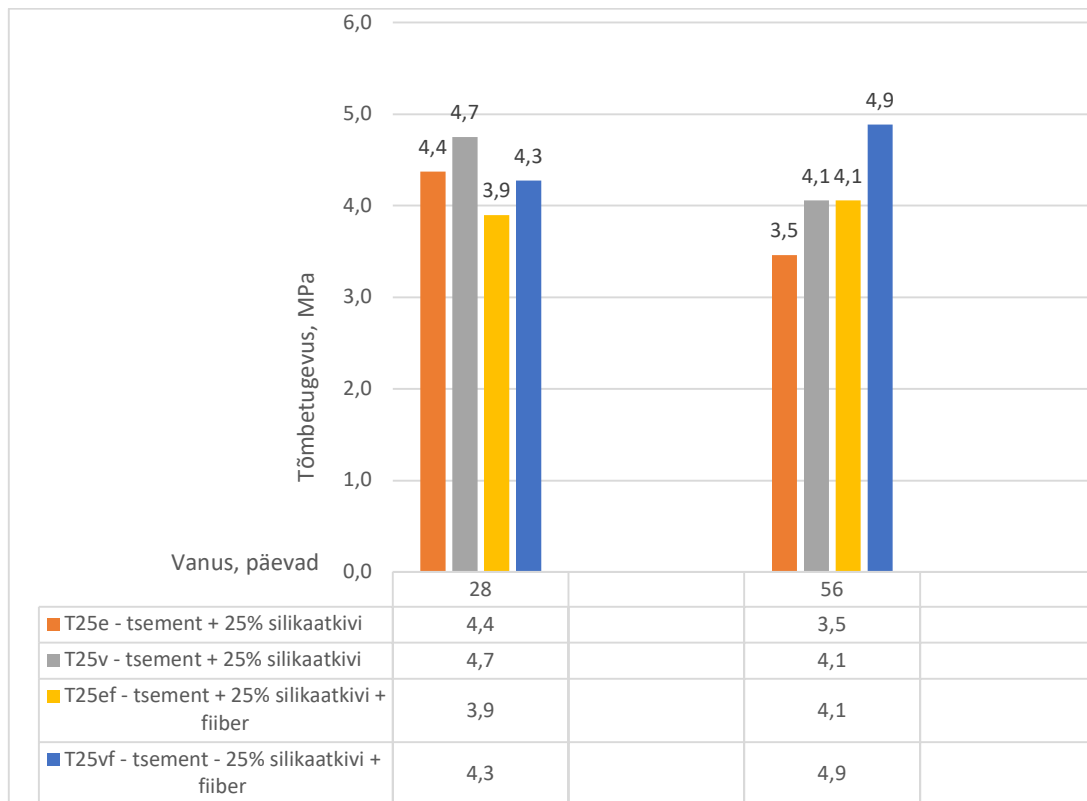


Graafik nr. 3.2.3.1. Betoonide nakketugevused, kus kasutati 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

3.2.4 Tõmbetugevus

28 päeva vanuste katsekehade keskmine tõmbetugevus peeneteralise betooni retseptidel on suurim lisaveega purustatud silikaatkiviga retseptil. Retsept on võrreldes lisaveega fiibriga retseptiga 11% suurema tõmbetugevusega. Vee lisamine tõstis mõlemal retseptitüübil tõmbetugevust 9% võrra võrreldes samade retseptidega, kus vee kogus oli lisatud määratud etaloni järgi. Polüpropüleenfiibri lisamisel tuli tugevam retsept T25vf ehk kus lisati lisavett parema betoonisegu töödeldavuse saavutamiseks. Polüpropüleenfiibri lisamine suurendab veevajadust, kuid koos purustatud silikaatkiviga vähendab tõmbetugevust 28 päeva vanustel katsekehadel.

56 päeva vanuste katsekehadel fiibriga retseptid olid kuni 21% suurema tõmbetugevusega kui retseptid, kuhu ei lisatud fiibrit. Saab järeldada, et fiibri lisamine koos lisaveega on mõistlik 25% purustatud silikaatkivi lisamisel täitematerjali kogumassist tsemendiga peeneteralise betooni retseptidesse.



Graafik nr. 3.2.4.1. Betoonide tõmbetugevused, kus kasutati 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena tsementi.

3.3 Betoon koos 10% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja põletatud põlevkiviga

Võrreldakse betooniretsepte markeeringuga P01e, P01v, P10e, P10v, P10ef ja P10vf. Käsitletakse segusid, kus lisati täitematerjalist 10% mahus purustatud silikaatkivi, polüpropüleenfiibrit ja ilma polüpropüleenfiibrita ning sideaineks kasutati põletatud põlevkivi. P01e retsepti puhul on kasutatud etaloni, mis oli määratud tsemendiga CEM I 42,5 N segudele. P01v segudel on põletatud põlevkivi jaoks leitud eraldi etalon.

3.3.1 Survetugevus

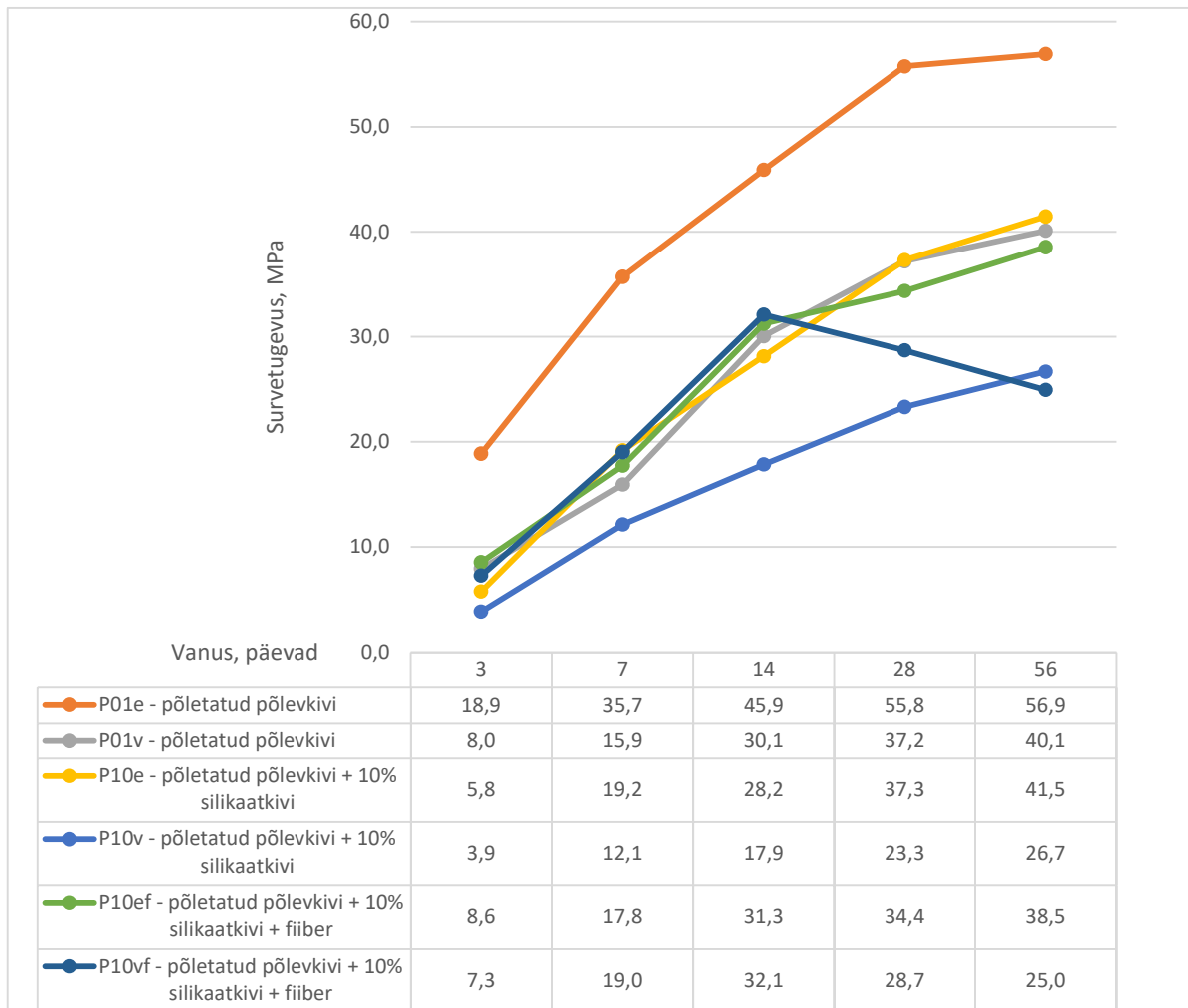
3 päeva vanusest seeriast põletatud põlevkivi retsept ilma lisaveeta annab kõige suurema survetugevuse võrreldes teiste retseptidega – tugevus on maksimaalselt kuni 80% suurem. Märkimisväärselt on näha, et retsept P01e, mille vajum raputuslual oli 103 mm ehk üpriski kuiv ja halva töödeldavusega betoonisegu 3D printimiseks, osutub kõige tugevamaks. Polüpropüleenfiibriga segud, P10ef ja P10vf, on samuti tugevamad esmase tugevuse saavutamisel. Fiibriga segud on kuni 55% võrra suurema survetugevusega kui ilma fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptid.

7 päeva vanusest seeriast kasvas lisaveeta põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni survetugevus 47% võrra. Lisaveega fiibriga retsepti survetugevus on 36% võrra suurem kui ilma fiibrita purustatud silikaatkiviga peeneteralises betoonis.

14 päeva vanusest seeriast lisaveeta ja lisaveega fiibriga retseptide survetugevus ühtlustub – vahe on 3%. Lisaveega fiibrita retsept on 44% võrra nõrgem kui lisaveega fiibriga retsept.

28 päeva vanuselt lisaveeta fiibriga ja fiibrita retseptidel on survetugevus suurem kui lisaveega fiibriga ja fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptidel kuni 60%. Põletatud põlevkiviga lisaveeta peeneteralise betooni retsept on endiselt kõige suurema tugevusega, survetugevus oli maksimaalselt kuni 58% võrra suurem.

56 päeva vanuselt on ilma purustatud silikaatkivita ja fiibrita retseptid nõrgemad kui ainult põletatud põlevkiviga retseptid. Põletatud põlevkiviga retseptid on kuni 56% võrra suurema survetugevusega kui fiibriga retseptid ning 53% suurema survetugevusega kui fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptid. Purustatud silikaatkivi ja fiibri lisamine nõrgestab oluliselt põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni survetugevust.



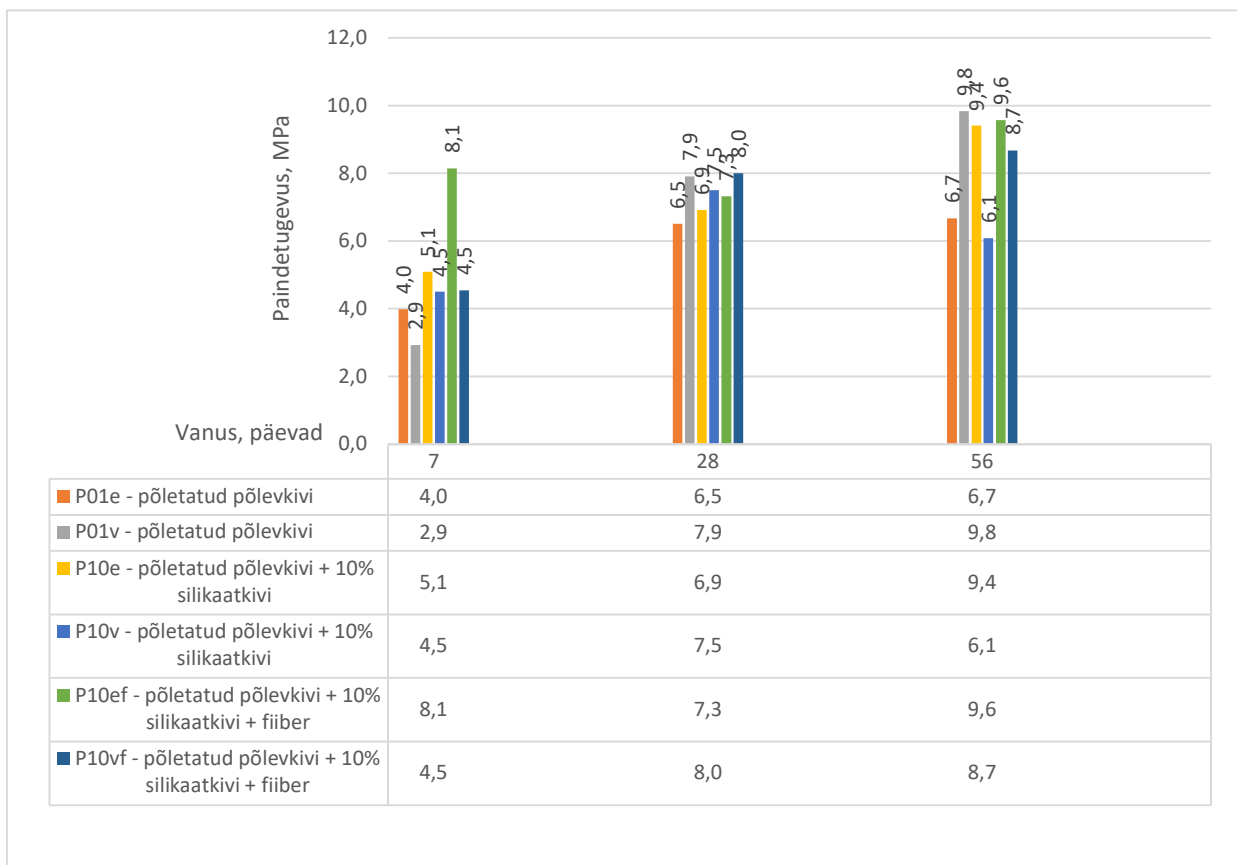
Graafik nr. 3.3.1.1. Betoonide survetugevused, kus kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

3.3.2 Paindetugevus

7 päeva vanusest seeriast on tohutu paindetugevuste vahe fiibriga retsepti ja ilma fiibrita põletatud põlevkiviga retseptide vahel – lausa 178% (8,1 MPa ja 2,9 MPa) on paindetugevus suurem fiibriga retseptil. Lisaveega purustatud silikaatkiviga betooni ja lisaveega fiibriga retseptide paindetugevus tuli sama (4,5 MPa).

28 päeva vanuse lisaveega põletatud põlevkivi peeneteralise betooni paindetugevus tuli 5% suurem kui lisaveega purustatud silikaatkiviga betoonil ning 1% võrra nõrgem kui fiibriga betoonil. Lisaveega peeneteraliste betoonide paindetugevused ühtlustuvad 28 päevaks. Betooni retseptil P10ef tulemuse langemine võib olla tingitud katsekehade kehva kvaliteediga tihendamisest.

56 päeva vanuse lisaveega põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni paindetugevus tuli suurim ning võrreldes lisaveega fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptiga oli 62% võrra tugevam. Võrreldes lisaveega fiibriga retseptiga oli paindetugevus 14% võrra suurem. Võrreldes 28 päeva vanuste katsekehade paindetugevus tõusis maksimaalselt 2,25 MPa võrra. Ilma lisaveeta põletatud põlevkiviga retsept tuli 47% võrra nõrgema paindetugevusega kui lisaveega põletatud põlevkiviga retsept. Paindetugevus oli suurim lisaveega põletatud põlevkiviga retseptil, aga survetugevuse erinevus lisaveeta retseptiga võrreldes oli 30%, seega tuhaga retsepti puhul on oluline vahe paindetugevuse ja survetugevuse vahel ainuüksi vee hulga erinevusest.



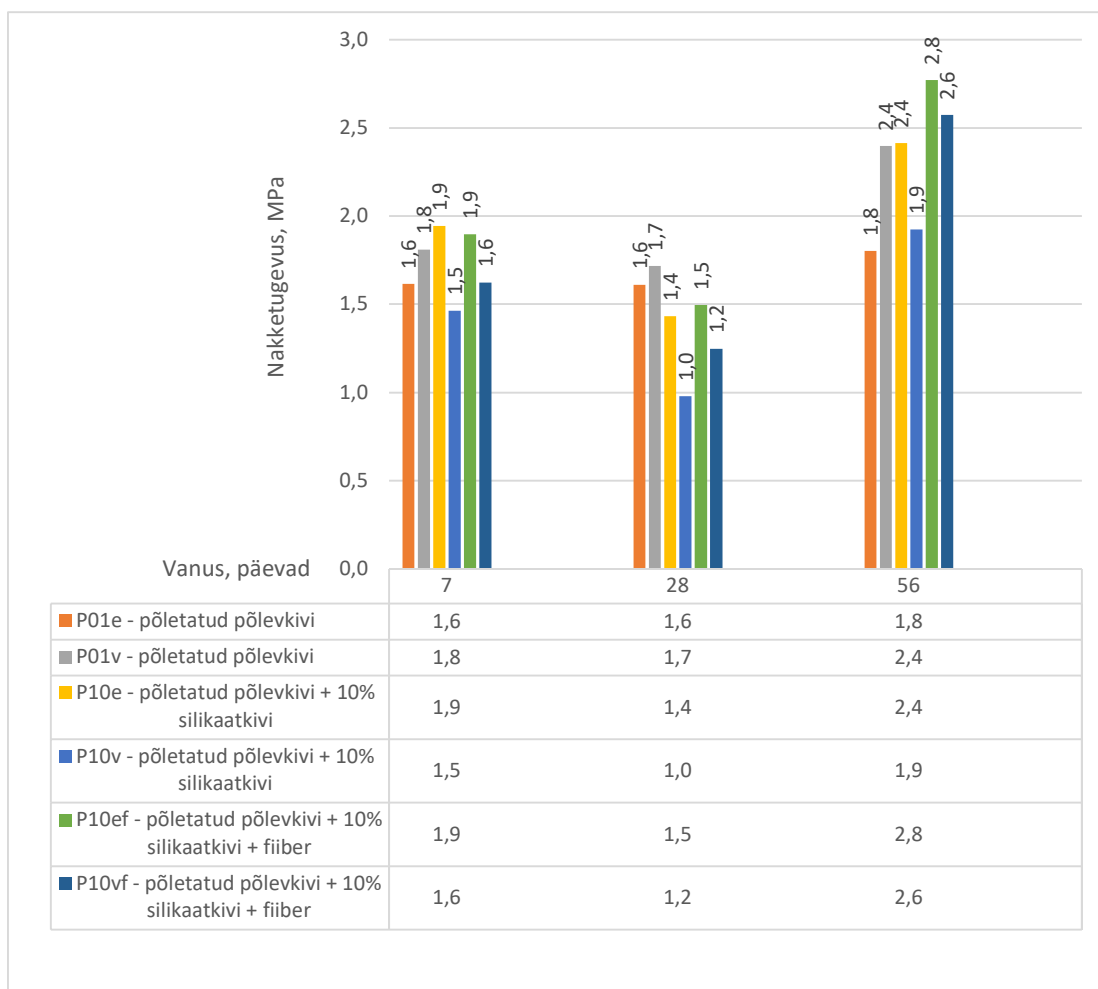
Graafik nr. 3.3.2.1. Betoonide paindetugevused, kus kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

3.3.3 Nakketugevus

Nakketugevus on 7 päeva vanuselt parim ilma lisaveeta fiibriga retseptil. Lisaveega retseptide võrdluses on põletatud põlevkiviga retsept 11% võrra suurem, kui fiibriga retsept ja 24% võrra suurem kui fiibrita purustatud silikaatkiviga retsept. Parandatud veevajadusega retsept P01v tuli tugevam kui tsemendiga retseptide puhul valitud etaloni alusel betoon. Retseptid, kuhu oli lisatud purustatud silikaatkivi ja vett soovitud töödeldavuse saavutamiseks, tulid nõrgemad kui retseptid, kus betooni veevajadus võeti määratud etaloni alusel. Polüpropüleenfiibri mõju on näha U14v ja P10vf retseptide võrdlusel, kus P10vf betoon tuli suurema nakketugevusega.

28 päeva võrdluses langes kõikide retseptide nakketugevus kuni 0,5 MPa. Tulemused on väiksemad kui 7 päeva vanustel katsekehadel. 28 päeva vanuste katsekehade puhul nakketugevus oli jaotunud ebaühtlaselt – polüpropüleenfiibriga katsekehadest oli T25vf nõrgem kui polüpropüleenfiibrita retseptid T25e ja T25v. 28 päeva vanustel katsekehadel esineb tugevuse langus nagu antud töös varem võrreldud retseptide puhul.

56 päeva võrdluses oli lisaveega fiibriga retsept kuni 7% tugevam kui fiibrita ja silikaatkivita põletatud põlevkiviga retsept. 56 päeva vanustel katsekehadel on näha, et fiibriga betoon P10ef ja P10vf on kõige tugevamad vaadeldavas seerias. Kõikidel betoonidel, mida vaadeldakse antud seerias, langes nakketugevus 28 päeva vanustel katsekehadel ja tõusis 56 päeva vanustel katsekehadel.



Graafik nr. 3.3.3.1. Betoonide nakketugevused, kus kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

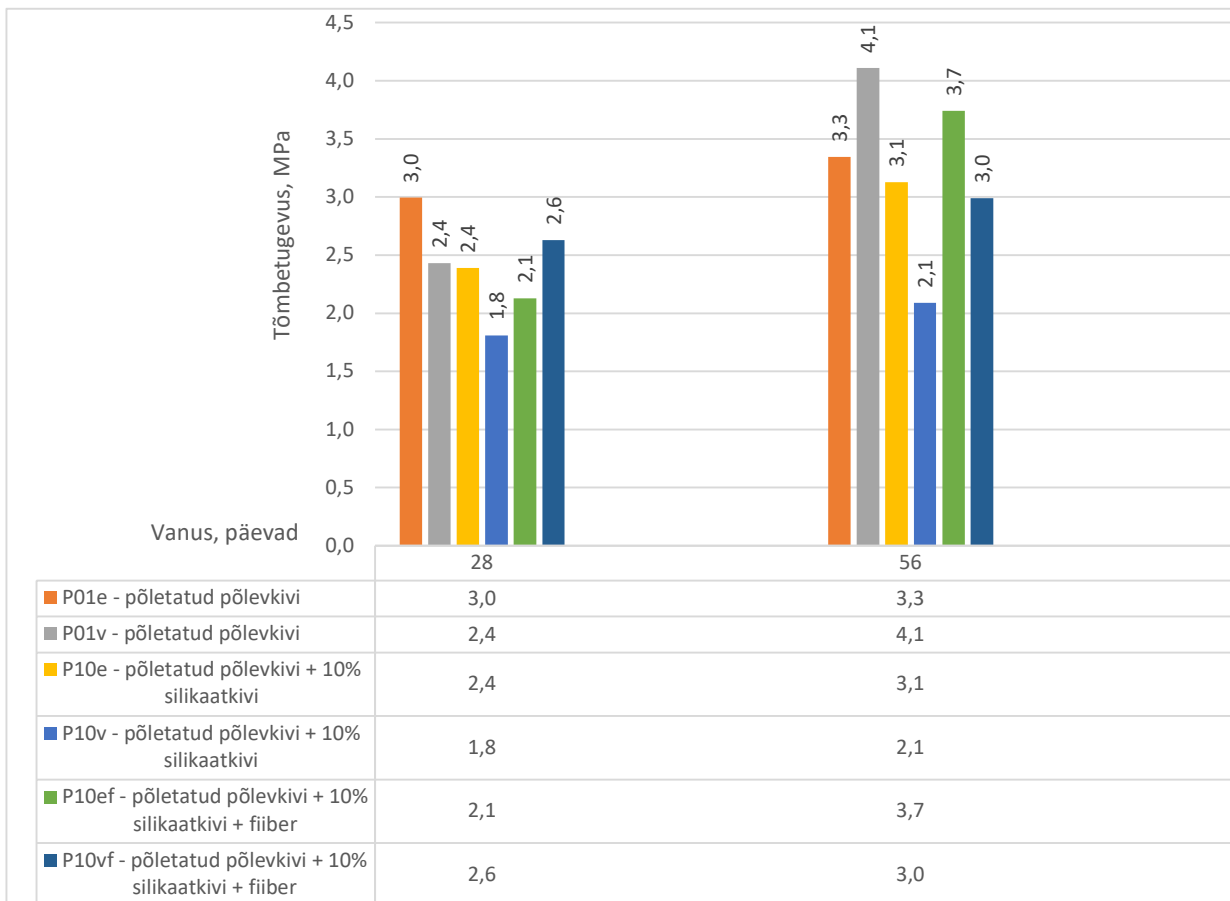
3.3.4 Tõmbetugevus

28 päeva vanuste katsekehade keskmine tõmbetugevus oli kuni 66% suurem põletatud põlevkiviga retseptidel võrreldes ilma fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptidega ja 14% suurem võrreldes fiibriga retseptidega.

Tõmbetugevus oli suurim retseptil P01e, kuhu polnud lisatud lisavett ega purustatud silikaatkivi. Purustatud silikaatkivi lisamine pigem vähendab betooni tõmbetugevust, kus on kasutatud sideainena põletatud põlevkivi. 28 päeva vanuste katsekehade puhul polüpropüleenfiiber lisavee lisamisel (P10vf) annab parema tulemuse kui segu P01v, kus puudus silikaatkivi ja polüpropüleenfiiber. 56 päeva vanuselt on siiski retsept P01v suurema tõmbetugevusega.

56 päeva vanuste katsekehade keskmine tõmbetugevus oli suurim lisaveega põletatud põlevkiviga retseptil (4,1 MPa), olles lisaveeta põletatud põlevkiviga retseptist 23% võrra suurema tõmbetugevusega. Lisaveega põletatud põlevkivi retsept on 37% võrra suurema tõmbetugevusega kui lisaveega fiibriga retsept ja 97% suurema tõmbetugevusega kui lisaveega fiibrita purustatud silikaatkiviga retsept.

Erinevalt betooni retseptidest, kus kasutati sideainena tsementi, kasvas põletatud põlevkiviga kõikide betooniretseptide tõmbetugevus. Kõige rohkem suurenes betooni P01v tõmbetugevus: 1,68 MPa võrra. 56 päeva võrdluses purustatud silikaatkivi lisamine pigem nõrgestab betooni, kus on kasutatud sideaineks põletatud põlevkivi. Lisaveega põletatud põlevkivi retsept osutub parimaks painde-, nakke- ja tõmbetugevuse ja töödeldavuse arvelt. Silikaatkivi lisamine 10% mahus ei tõstnud kuidagi peeneteralise betooni tugevusomadusi arvestades töödeldavust ning on mõistlik kasutada põletatud põlevkiviga betooni ilma purustatud silikaatkivita 3D printimise jaoks.



Graafik nr. 3.3.4.1. Betoonide tõmbetugevused, kus kasutati 10% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

3.4 Betoon koos 25% purustatud silikaatkivi sisaldusega ja põletatud põlevkiviga

Võrreldakse betooniretsepte markeeringuga P25e, P25ef ja P25vf. Käsitletakse segusid, kus lisati täitematerjalist 25% mahus purustatud silikaatkivi, polüpropüleenfiibrit ja ilma polüpropüleenfiibrita ning sideaineks kasutati põletatud põlevkivi.

3.4.1 Survetugevus

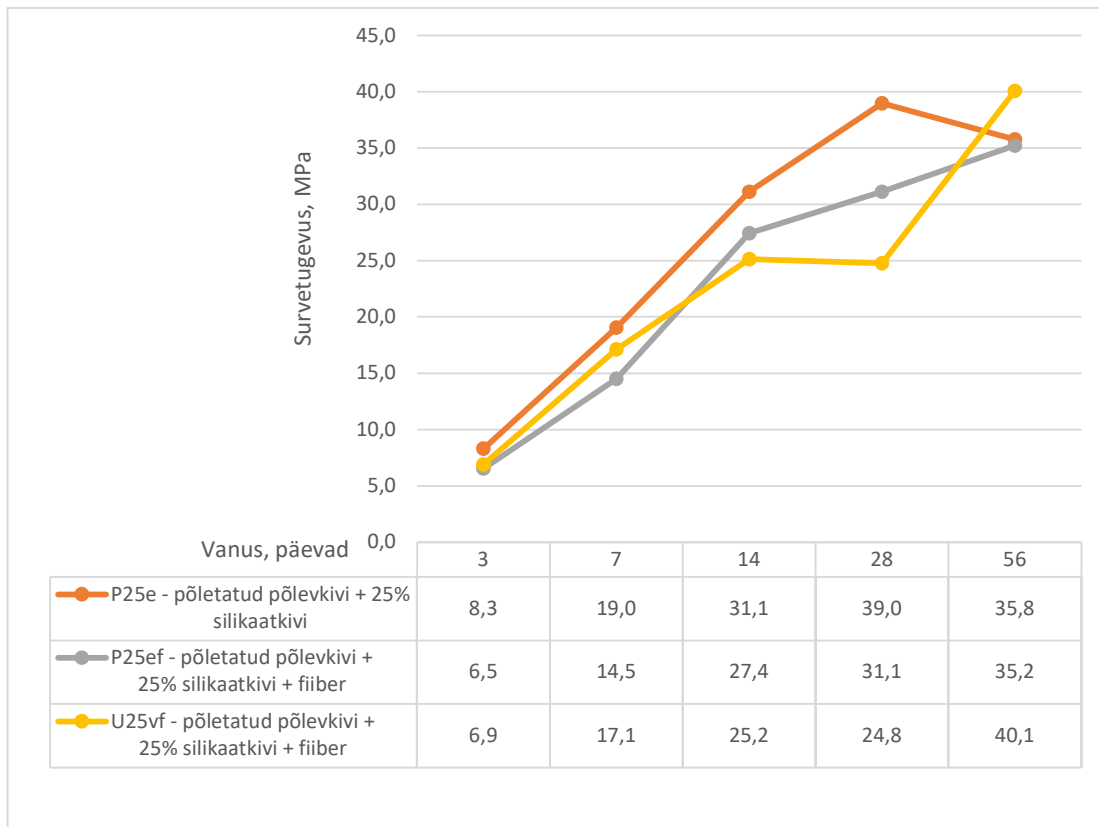
3 päeva vanusest seeriast on kuni 20% suurem survetugevus ilma fiibrita purustatud silikaatkiviga retseptil, võrreldes fiibriga retseptidega.

7 päeva vanuselt kasvab survetugevus fiibrita retseptil 56% võrra. Fiibrita retsept on 10% võrra suurema survetugevusega kui fiibriga retseptid.

14 päeva vanuselt kasvab fiibrita retsepti survetugevus 39% võrra võrreldes 7 päeva vanuse survetugevusega. Fiibrita retsept on kuni 12% suurema survetugevusega kui fiibriga retseptid.

28 päeva vanuselt survetugevuse kasv aeglustub ning kasvab 20% võrra fiibrita retseptil, retsept on endiselt tugevaim vaadeldavas seerias. Retsept on 36% võrra tugevam kui fiibriga retseptid.

56 päeva vanuselt kasvab survetugevus fiibrita retseptil 9%. Fiibrita retsept on 12% võrra nõrgem kui fiibriga retsept. Andmete põhjal võib oletada, et retseptil P25vf võis esineda katsekehades defekte 28 päeva vanustel katsekehadel ja 56 päevastel katsekehade hüppeline kasv on tingitud heast tihendamisest. Fiibri lisamine pole survetugevuse seisukohalt otstarbekas varasema survetugevuse saavutamisel põletatud põlevkiviga betoonis, kuhu on lisatud 25% mahus täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi. 56. päeva vanuste katsekehade tulemuste põhjal tundub fiibri lisamine kasulik, suurendades kuni 12% võrra survetugevust.



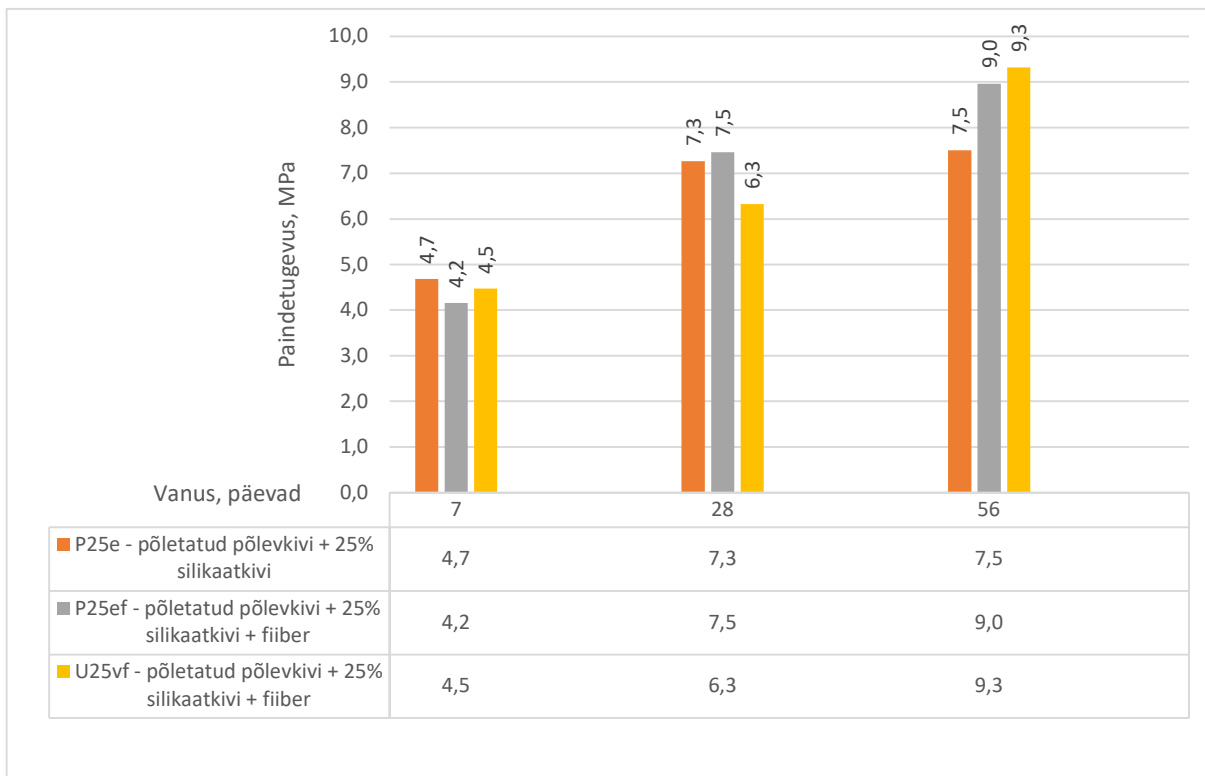
Graafik nr. 3.4.1.1. Betoonide survetugevused, kus kasutati 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

3.4.2 Paindetugevus

7 päeva vanusest seeriast on tugevaim ilma fiibrita retsept, mis on 5% võrra suurema paindetugevusega kui fiibriga retsept.

28 päeva vanusest seeriast on suurima paindetugevusega lisaveeta fiibriga retsept, mis on võrreldes fiibrita retseptiga 3% võrra suurema paindetugevusega. Fiibrita retsept on 13% võrra suurema paindetugevusega kui lisaveega fiibriga retsept.

56 päeva vanuselt tugevaim on lisaveega fiibriga retsept, mille paindetugevus on võrreldes ilma fiibrita retseptiga 24% suurem. Arvestades survetugevust ja paindetugevust, siis fiibri lisamine on 56 päeva vanuselt peeneteralises betoonis hea viis tugevusomaduste suurendamiseks 25% purustatud silikaatkiviga põletatud põlevkiviga retseptides.



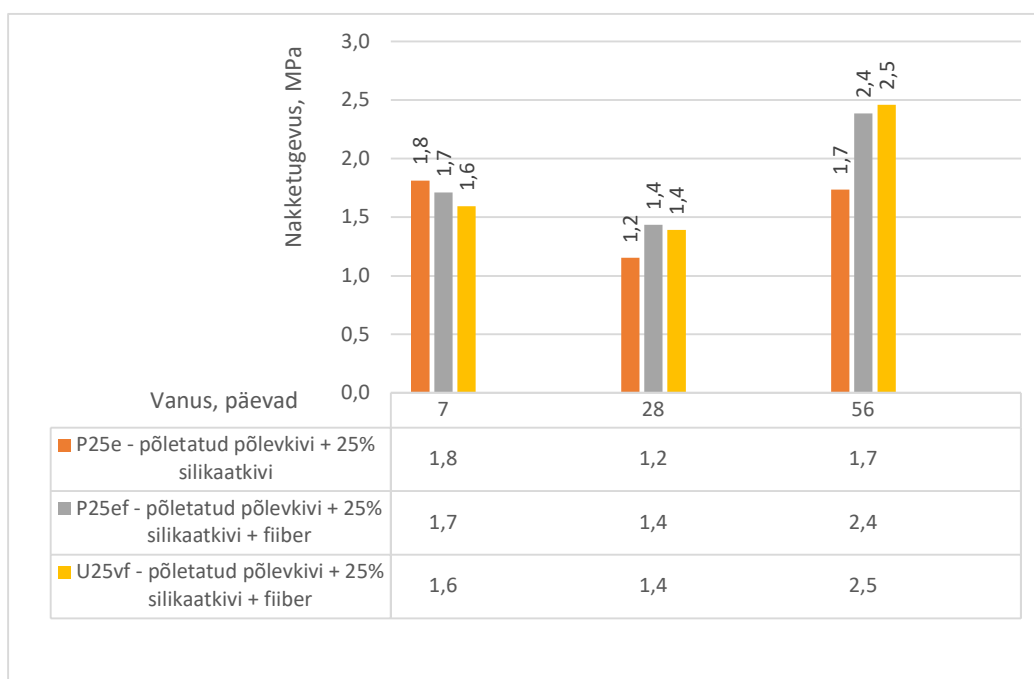
Graafik nr. 3.4.2.1. Betoonide tõmbetugevused, kus kasutati 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

3.4.3 Nakketugevus

7 päeva võrdluses on fiibriga retsepti nakketugevus kuni 12% suurem kui lisaveega fiibriga retsept. Fiibriga retsept on tugevam P25ef betoon ehk kus veevajadust ei muudetud ning oli kehvema töödeldavusega segu.

28 päeva võrdluses langeb retseptide nakketugevus kuni 36% võrra. Fiibriga retseptide nakketugevus on suurem 20% võrra võrreldes fiibriga retseptiga.

56 päeva võrdluses on lisaveega fiibriga retsepti nakketugevus suurem 42% võrra, võrreldes fiibriga retseptiga. Kõikidel betoonidel tõusis nakketugevus 56 päeva vanustel katsekehadel – kasv oli kuni 43%. Fiibriga betoonid P25ef ja P25vf tulid suurema nakketugevusega, kui ilma fiibriga betoon P25e. Võib väita, et fiibri kasutamine on mõistlik ja suurendab märkimisväärselt nakketugevust.



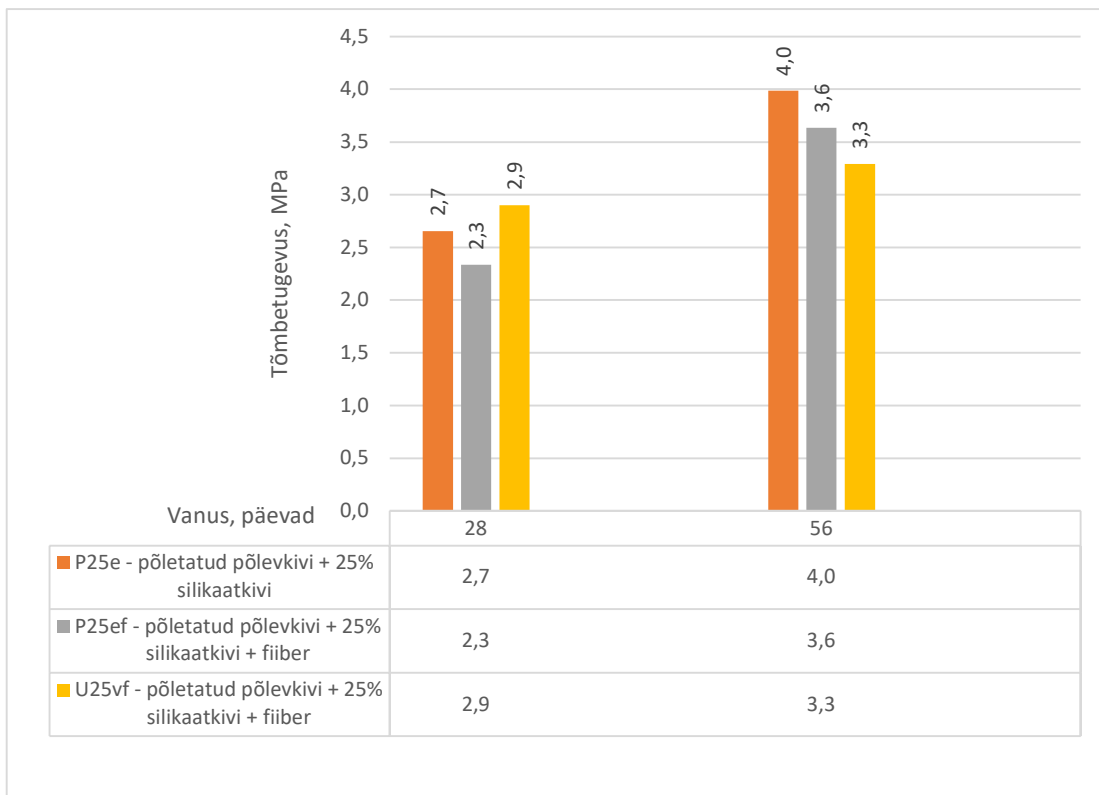
Graafik nr. 3.4.3.1. Betoonide nakketugevused, kus kasutati 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

3.4.4 Tõmbetugevus

28 päeva vanuste katsekehade keskmine tõmbetugevus on suurim lisaveega fiibriga retseptil – retsept on 9% võrra suurema tõmbetugevusega kui fiibriga retsept.

56 päeva vanuselt on fiibriga retsepti tõmbetugevus suurim – retsept on kuni 17% suurema tõmbetugevusega kui fiibriga retseptid.

Kõikidel põletatud põlevkiviga retseptidel kasvas tõmbetugevus. Purustatud silikaatkivi lisamine vähendab tõmbetugevust.



Graafik nr. 3.4.4.1. Betoonide tõmbetugevused, kus kasutati 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi ja sideainena põletatud põlevkivi.

3.5 Tulemuste üldvõrdlus

3.5.1 Survetugevus

Kolmepäevastest katsekehadedest saaks ehitusplatsidel segude kontekstis kasutusele võtta tsementidega retseptid ehk retseptid tähistusega T01v, T10e, T10v, T25e, T25v, T10ef, T10vf, T25ef ja T25vf, kuna nendega on võimalik saavutada arvestatav survetugevus. Eelnevalt mainitud betooniretseptide puhul oli esmane survetugevus vahemikus 25 MPa kuni 38 MPa. Kui kaaluda elementide tootmist, tuleks põletatud põlevkiviga retseptide puhul anda kivistumiseks aega 14 päeva, et saavutada samas suurusjärgus survetugevus.

Kui võrrelda põletatud põlevkiviga betooniretseptide retseptidega, kus kasutati sideaineks tsementi, siis 56 päeva lõikes on tsemendiga retseptid saavutanud 10 kuni 15 MPa suurema survetugevuse kui põletatud põlevkiviga peeneteraliseid betoonid. Erandiks on retsept P01e, mille töödeldavus (raputuslaua vajum oli 103,0 mm) oli erakordselt kehva ja pole sobilik 3D prinditava betooni jaoks – retsept osutus nii 28 (55 MPa) päevaste kui ka 56 (56MPa) päevaste katsekehade seas kõige tugevamaks ning oli võrreldes tugevaima tsemendiretseptiga, kuhu oli lisatud 25% purustatud silikaatkivi täitematerjali kogumassist ja fiibrit T25ef (50MPa) 6,11 MPa suurem.

Retseptid, kus kasutati sideainena tsementi ja kus oli täitematerjali kogumassist lisatud 25% purustatud silikaatkivi, tulid suurema survetugevusega 28 päeva lõikes kui ka 56 päeva lõikes, võrreldes retseptidega, millesse oli lisatud täitematerjali kogumassist 10% purustatud silikaatkivi. Erandiks on retsept T25vf 56 (katsekehade tihedused 2185 kg/m³, 2171 kg/m³ ja 2160 kg/m³) päevased katsekehad, sest katsekehad tulid väiksema tihedusega kui 28 päevased katsekehad (katsekehade tihedused 2190 kg/m³, 2211 kg/m³ ja 2201 kg/m³) ehk olid kehvemini tihendatud.

Põletatud põlevkiviga retseptide puhul on näha, et kehvema raputuslaua vajumiga ehk töödeldavusega segud tulid suurema survetugevusega kui katsekehad, kus lisati lisavett soovitud töödeldavuse saavutamiseks. Vahe tuleb eriti hästi nähtavaks alates 14 päeva vanustest katsekehadedest. Survetugevuste vahe on suurusjärgus 10 kuni 20 MPa. Retseptid 10% purustatud silikaatkiviga täitematerjali kogumassist tulid tugevamad, kui retseptid, kus oli kasutatud täitematerjali kogumassist 25% purustatud silikaatkivi – vahe on umbes 5 MPa.

Polüpropüleenfiibri lisamine betooniretsepti kogumassist 0,05% vähendab betooni survetugevust ning suurendab veevajadust.

Purustatud silikaatkivi lisamine 10% täitematerjali kogumassist koos lisaveega suurendab survetugevust võrreldes retseptiga, kuhu ei lisatud purustatud silikaatkivi. 25% lisatud purustatud silikaatkiviga retseptide puhul survetugevus on tugevam kui lisada sinna juurde polüpropüleenfiibrit ja veekogust mitte muuta (jällegi väheneb töödeldavus selle arvelt ning pole soodne 3D printimise seisukohalt kuna võivad tekkida erinevad tõrked printimisel), vastasel juhul on betooniresept ilma silikaatkivita suurema survetugevusega (T01v tulemusega 49 MPa).

Tsemendiga retseptides on 56 päeva puhul silikaatkivi mõju pigem väike ja olulisem mõju on 28 päevaste katsekehade puhul. Põletatud põlevkiviga retseptide puhul survetugevus langeb 56 päevaste katsekehade puhul, kus on täitematerjali kogumassist kasutatud 25% silikaatkivi võrreldes põletatud põlevkiviga retseptidega, kus on täitematerjali kogumassist kasutatud 10% purustatud silikaatkivi. Põletatud põlevkiviga retseptide puhul purustatud silikaatkivi lisamine vähendab surve-, painde- ja tõmbetugevust.

3.5.2 Paindetugevus

Kui võrrelda põletatud põlevkiviga peeneteralise betoonireseptide retseptidega, kus kasutati sideaineks tsementi, siis 56 päeva lõikes on tsemendiga retseptid saavutanud suurema paindetugevuse kuni 4,80 MPa rohkem kui põletatud põlevkiviga betoonid. Üldjuhul olid kõikumised kuni 2 MPa ulatuses. Kõige nõrgema paindetugevusega retseptid olid P01e (6,68 MPa), P25e (7,50 MPa) ja P10v (6,09 MPa), mis olid ka kehva töödeldavusega segud. Paindetugevuse kasv on oluliselt suurem põletatud põlevkiviga retseptidel 28 päeva pealt 56 päeva peale minnes kui retseptidel, kus kasutati tsementi sideainena.

Retseptid, kus kasutati sideainena tsementi, on paindetugevus on 56 päeva lõikes tugevam retseptidel, kus on oli lisatud täitematerjali kogumassist 25% purustatud silikaatkivi – kõige suurema tugevuse saavutas retsept T25vf ehk, kus kasutati 25% purustatud silikaatkivi täitematerjali kogumassist, lisavett ja fiibrit (11,48 MPa), mis oli ka hea töödeldavusega (vajum raputuslaual 151,0 mm).

Retseptid, kus kasutati sideainena põletatud põlevkivi, on paindetugevus 56 päeva lõikes suurem retseptidel, kus kasutati täitematerjali kogumassist 10% purustatud silikaatkivi – retseptid P01v (9,84 MPa), P10e (9,41 MPa) ja P10ef (9,57 MPa). Mainitud segudel oli kehvem töödeldavus. Erandiks oli retsept P01v, kuhu ei lisatud purustatud silikaatkivi. Võrreldes retseptiga P01v saab järeldada, et purustatud silikaatkivi lisamine nii 10% kui ka 25% mahus on betooni paindetugevust nõrgestava

toimega. P01e, mis oli äärmiselt kehva töödeldavusega (raputuslaua vajum 103,0 mm) oli paindetugevuse poolest nõrk kuigi survetugevuse seisukohalt oli tugev.

56 päeva vanustel katsekehadel on tsemendiga retseptide puhul silikaatkivi lisamine paindetugevust suurendanud – vaadeldavast seeriast oli T01v kõige väiksema tugevusega 9,20 MPa ehk silikaatkivi lisamine 10% kui ka 25% mahus kogust täitematerjali mahust on kasulik. Leitud veevajadusega tsemendiretseptide puhul on tugevaim retsept 25% purustatud silikaatkiviga (T25vf tulemusega 11,48 MPa vs T10v tulemusega 10,70 MPa). Samas on U21 retsepti lisatud polüpropüleen fiibrit 0,05% ulatuses täitematerjali kogumassist, mis omakorda on suurendanud paindetugevust. Tsemendiga retseptide tugevuse kasv 28 päeva vanuste katsekehade ja 56 katsekehade vahel oli umbes 1,50 MPa ehk oluliselt ei suurenenud.

P25ef ja P25vf põletatud põlevkiviga retseptide võrdlusest saab järeldada, et polüpropüleenfiibri lisamisel ka veevajadus suureneb. Kui lisatava veekogus jätta samaks, siis P25ef (8,96 MPa) retsepti keskmise paindetugevuse põhjal tuli paindetugevus 0,36 MPa nõrgem kui retseptil P25vf (9,32 MPa). Ka tsemendiga retseptide puhul on märgata fiibri lisamisel veevajaduse tõstmist, et suureneks paindetugevus – T25ef (10,08 MPa) ja T25vf (11,48 MPa). Polüpropüleenfiibri lisamine igal juhul parandas paindetugevust – erandiks on kaks retsepti P25ef ja P10vf.

P25e ja P25ef retseptide võrdlusel (mõlemad retseptid on 25% purustatud silikaatkiviga) 56 päeva vanuste katsekehade võrdlemisel on polüpropüleenfiibriga retsept P25ef (8,96 MPa) suurem 1,46 MPa võrra kui P25e (7,50 MPa).

3.5.3 Nakketugevus

Kõikide retseptide puhul, kus kasutati purustatud silikaatkivi toimus nakketugevuse langus 28 päeva vanustel katsekehadel. 56 päeva vanustel katsekehadel oli nakketugevus tugevam või sama tugev kui 7 päevastel katsekehadel.

56 päeva vanuselt tsemendiga betooniretseptid T01v, T10e, T10v, T10ef, T10vf, T25e ja T25v olid suurema nakketugevusega kui põletatud põlevkiviga retseptid. Põletatud põlevkiviga retseptidest oli tugevaim 56 päeva vanuselt retsept P10ef (2,8 MPa), hea töödeldavusega segudest oli aga P10vf (2,6 MPa).

Tsemendiga retseptide puhul 56 päeva vanustel katsekehadel on 25% silikaatkiviga retseptid (T25e ja T25v) ilma fiibrita nõrgemad kui 10% silikaatkivi sisaldusega retseptid (T10e ja T10v).

28 päeva vanuste katsekehade puhul on tugevamad kõik retseptid, mis olid valmistatud tsemendiga, välja arvatud retsept T25vf.

Põletatud põlevkiviga retseptides silikaatkivi lisamine 25% täitematerjali kogumassist annab suurema nakketugevuse kui põletatud põlevkivita retseptid 10% purustatud silikaatkiviga.

Kõige suurema nakketugevusega oli retsept T10vf (tulemusega 2,8 MPa), kus kasutati sideaineks tsementi ja täitematerjali kogumassist 10% purustatud silikaatkivi ning polüpropüleenfiibrit (0,05%).

Retseptidel T10e ja T10v nakketugevus 7 päevastel katsekehadel praktiliselt ei muutunud kui võrrelda 56 päeva vanuste katsekehadega.

28 päeva vanustest katsekehadest nakketugevus kasvas kahel retseptil T01v ja T25v.

3D printimise seisukohalt head segud printimiseks nakketugevuse analüüsi põhjal oleks T10v (7 päevaga saavutab arvestatava nakketugevuse), T10vf, T25v, P10VF ja P25vf.

Kõige väiksema nakketugevuse kasvuga oli retsept tsemendiga retsept, kus kasutati fiibrit ja 25% täitematerjali kogumassist purustatud silikaatkivi, mis suurenes 0,03 MPa võrra (7 päeva vs 56 päeva).

Tsemendiga retseptid ilma fiibrita tulid praktiliselt samas suurusjärgus nii 10% kui ka 25% silikaatkivi lisamisel täitematerjali kogumassist. Fiiber suurendas nakketugevust 10% purustatud silikaatkiviga peeneteralises betoonis, kus kasutati lisavett (T10vf), 25% puhul aga tugevus vähenes. Peeneteralised betoonid lisaveeta koos fiibriga olid väiksema nakketugevusega nii 10% kui 25% purustatud silikaatkivi sisalduse puhul võrreldes segudega, kuhu fiibrit ei lisatud. Võib oletada, et fiibri lisamisel segu tuleb kuivem osadel juhtudel ja teistel kuivab liigne vesi välja ja katsekeha tuleb poorsem.

3.5.4 Tõmbetugevus

Erinevalt betooni retseptidest, kus kasutati sideainena tsementi, kasvas põletatud põlevkiviga kõikide betooniretseptide tõmbetugevus. 56 päeva võrdluses purustatud silikaatkivi lisamine pigem nõrgestab betooni, kus on kasutatud sideaineks põletatud põlevkivi.

56 päeva vanuste katsekehade seast oli kõige tugevam retsept T25vf tulemusega 4,9 MPa. 28 päeva vanuste katsekehade seast oli kõige tugevam retsept T25v.

Kõikidel põletatud põlevkiviga retseptidel kasvas tõmbetugevus. Purustatud silikaatkivi lisamine vähendab tõmbetugevust põletatud põlevkiviga peeneteralistes betoonides.

28 päeva vanuste katsekehade võrdluses olid kõik tsemendiga peeneteralised betoonide retseptid suurema tõmbetugevusega (välja arvatud retsept T10ef), kui retseptid, kus kasutati sideainena põletatud põlevkivi.

Tsemendiga täitematerjali kogumassist 20% mahus purustatud silikaatkivi kasutamine koos polüpropüleenfiibriga toob endaga kaasa tõmbetugevuse languse retseptide suhtes, kus polüpropüleenfiibrit ei kasutatud (T25e ja T25v), kuid retseptid tulevad tugevamad kui betoon ilma purustatud silikaatkivita (T01v).

Tsemendiga täitematerjali kogumassist 25% purustatud silikaatkivi kasutamine annab suurema tõmbetugevuse kui retseptid, kus kasutati 10% purustatud silikaatkivi täitematerjali kogumassist 28 päeva vanuste katsekehade analüüsi põhjal.

Tsemendiga täitematerjali kogumassist 25% purustatud silikaatkivi kasutamine ilma polüpropüleenfiibrita suurendab tõmbetugevust (U12v ja T25V vs T25ef ja T25vf).

Põletatud põlevkiviga retseptides koos täitematerjali kogumassist 25% purustatud silikaatkiviga retseptides polüpropüleenfiibri kasutamine on soodne, kui lisavett mitte lisada (P25ef). Lisavee lisamisel tuleb 56 päeva vanuste katsekehade tulemuste põhjal tõmbetugevus madalam (P25vf).

KOKKUVÕTE

Lõputöös uuriti purustatud silikaatkivi kasutamist peeneteralises betoonis, kus sideaineks kasutati tsementi või põletatud põlevkivi. Katsetati polüpropüleenfiibri mõju uuritavate betoonisegude tugevusomadustele.

Töö analüüsi põhjal saab teha järgmised järeldused:

1. Purustatud silikaatkivi lisamine 10% ja 25% täitematerjali kogumassist suurendab tsemendiga betooni paindetugevust 25%.
2. Purustatud silikaatkivi lisamine 25% täitematerjali kogumassist suurendab tsemendiga betoonil tõmbetugevust kuni 20%.
3. Purustatud silikaatkivi lisamine 25% täitematerjali kogumassist suurendab tsemendiga betooni survetugevust sama lisatava veekoguse hulga puhul, mis ilma purustatud silikaatkivita betoonis.
4. Purustatud silikaatkivi lisamine 10% ja 25% täitematerjali kogumassist suurendab tsemendiga betoonil nakketugevust kuni 10%.
5. Põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni survetugevus on tugevam 56 päeva vanuselt kuni 14% kui tsemendiga betoon sama lisatava veekoguse juures, aga põletatud põlevkiviga betooni töödeldavus langeb märkimisväärselt.
6. Purustatud silikaatkivi lisamine nõrgestab põletatud põlevkiviga betoonil tõmbetugevust kuni 49%.
7. Põletatud põlevkiviga, fiibriga ja purustatud silikaatkiviga 25% täitematerjali kogumassist betoon annab 42% võrra suurema nakketugevuse, 12% võrra suurema survetugevuse ja 24% võrra suurema paindetugevuse kui fiibrita samad retseptid.
8. Purustatud silikaatkivi lisamine suurendab betoonisegu veevajadust.
9. Põletatud põlevkivi kasutamine suurendab betoonisegu veevajadust.
10. Polüpropüleenfiibri lisamine suurendab betoonisegu veevajadust.

11. Polüpropüleenfiibri lisamine betoonisegu kogumassist 0,05% mahus suurendab maksimaalselt kuni 25% paindetugevust tsemendiga ja purustatud silikaatkiviga betoonis.
12. Polüpropüleenfiibri lisamine vähendab nii tsemendiga kui ka põletatud põlevkiviga peeneteralise betooni survetugevust – tsemendiga kuni 18% ja põletatud põlevkiviga kuni 61%.
13. Polüpropüleenfiibri lisamine suurendab põletatud põlevkiviga retseptides nakketugevust. Põletatud põlevkiviga retseptid, millesse oli lisatud täitematerjali kogumassist 25% purustatud silikaatkivi, olid suurema nakketugevusega kui need põletatud põlevkiviga retseptid, kuhu oli lisatud täitematerjali kogumassist 10% purustatud silikaatkivi.
14. Purustatud silikaatkivi lisamine vähendab tõmbetugevust kuni 50% peeneteralises betoonis, kus on kasutatud sideainena põletatud põlevkivi.
15. Polüpropüleenfiibri lisamine suurendab veevajadust ning koos purustatud silikaatkiviga vähendab tõmbetugevust.
16. Polüpropüleenfiibri lisamine koos lisaveega on mõistlik 25% purustatud silikaatkivi lisamisel täitematerjali kogumassist tsemendiga peeneteralise betooni retseptidesse.

Lõputöö analüüsi alusel on potentsiaali kasutada nii tavaliste betoonisegude kui ka 3D printitavate betoonisegude valmistamiseks põletatud põlevkivi täielikult tsemendi asendajana ja purustatud silikaatkivi 10% kui ka 25% mahus täitematerjali kogumassist.

Tuleviku kontekstis tuleb kindlasti uurida sellise betooni tootmise maksumust (silikaatkivi purustamine ja käsitsi sõelumine on ajaliselt pikk protsess) ja CO₂ ekvivalent jalajälge.

SUMMARY

The thesis investigated the use of crushed silicate rock in fine-grained concrete, where cement or burnt oil shale was used as a binder. The effect of polypropylene fibers on the strength properties of the concrete mixes under study was examined.

Based on the analysis of the work, the following conclusions can be drawn:

1. Adding crushed silicate rock at 10% and 25% of the total aggregate volume increases the flexural strength of concrete with cement by 25%.
2. Adding crushed silicate rock at 25% of the total aggregate volume increases the tensile strength of concrete with cement by up to 20%.
3. Adding crushed silicate rock at 25% of the total aggregate volume increases the compressive strength of concrete with cement by the same amount of added water, compared to concrete without crushed silicate rock.
4. Adding crushed silicate rock at 10% and 25% of the total aggregate volume increases the bond strength of concrete with cement by up to 10%.
5. The compressive strength of fine-grained concrete with burnt oil shale is stronger by up to 14% at 56 days old compared to concrete with cement with the same added water, but the workability of concrete with burnt oil shale decreases significantly.
6. Adding crushed silicate rock weakens the tensile strength of concrete with burnt oil shale by up to 49%.
7. Concrete with 25% of crushed silicate rock, fibers, and burnt oil shale from the total aggregate volume provides 42% higher bond strength, 12% higher compressive strength, and 24% higher flexural strength compared to fiberless concrete with the same recipes.
8. Adding crushed silicate rock increases the water demand of the concrete mix.
9. Using burnt oil shale increases the water demand of the concrete mix.
10. Adding polypropylene fibers increases the water demand of the concrete mix.

11. Adding polypropylene fibers at a rate of 0.05% of the total mix volume increases flexural strength by up to 25% in concrete with cement and crushed silicate rock.
12. Adding polypropylene fibers reduces both the compressive strength of fine-grained concrete with cement and burnt oil shale, up to -18% with cement and up to -61% with burnt oil shale.
13. Adding polypropylene fibers increases the bond strength in recipes with burnt oil shale. Recipes with burnt oil shale containing 25% crushed silicate rock from the total aggregate volume had higher bond strength than those with burnt oil shale containing 10% crushed silicate rock.
14. Adding crushed silicate rock weakens the tensile strength by up to 50% in fine-grained concrete with burnt oil shale as a binder.
15. Adding polypropylene fibers increases the water demand but, in conjunction with crushed silicate rock, reduces the tensile strength.
16. Adding polypropylene fibers with additional water is reasonable when adding 25% crushed silicate rock from the total aggregate volume to concrete recipes with cement for fine-grained concrete.

Based on the thesis analysis, there is potential to use burnt oil shale as a complete substitute for cement and crushed silicate rock at 10% and 25% of the total aggregate volume for the production of both conventional concrete mixes and 3D printable concrete mixes. In the future, the cost of producing such concrete (crushing silicate rock and manual sieving being a time-consuming process) and the CO₂ equivalent footprint must certainly be investigated.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] H. Tu, Z. Wei, A. Bahrami, N. Ben Kahla, A. Ahmad, and Y. O. Özkılıç, "Recent advancements and future trends in 3D concrete printing using waste materials," *Developments in the Built Environment*, vol. 16, p. 100187, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.DIBE.2023.100187.
- [2] G. H. Ahmed, "A review of '3D concrete printing': Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability," *Journal of Building Engineering*, vol. 66, p. 105863, May 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.105863.
- [3] F. C. N. D. and R. S. U. C. of L. B. S. of A. M. M. J. G. G. R. and V. S. Alvaro Lopez Rodriguez, "3D printitud betoonist struktuurid: amalgamma," 2015.
- [4] Mihkel Pogga, "3D PRINTIMISBETOONI KOOSTISE ALUSUURING BASE STUDY FOR THE COMPOSITION OF 3D-PRINTABLE CONCRETE MAGISTRITÖÖ," 2021.
- [5] Chris Zweifel, "Shotcrete Domes: A Model of Sustainability ," 2010.
- [6] MARTTI KIISA, "BETOONKONSTRUKTSIOONIDE PROJEKTEERIMISE ALUSED ," Jan. 2020.
- [7] Tairi Sepp, "KLAASKERGTÄITEMATERJALIGA 3D PRINTIMISBETOONI KOOSTISE VÄLJATÖÖTAMINE," 2023.
- [8] S. Oymael, "SUITABILITY OF OIL SHALE ASH AS A CONSTITUENT OF CEMENT," 2007. Accessed: Mar. 13, 2024. [Online]. Available: <https://kirj.ee/public/oilshale/oil-2007-1-6.pdf>
- [9] M. Al-Hasan, "BEHAVIOR OF CONCRETE MADE USING OIL SHALE ASH AND CEMENT MIXTURES," 2006.
- [10] Tiina Hain, "Põlevkivituhk betoonilisandina - baasuuringud," 2021.
- [11] Enefit AS, " Enefit AS koduleht <https://www.energia.ee/ari/toostuslahendused/tuhk/>," 2024.
- [12] S. Ilomets *et al.*, "Tühjenenud korterelamu lammutamisel tekkivate materjalide korduskasutuse ja ringlussevõtu rakendusuuring-1. etapi vaheraport Tellija: Autorid: Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium," 2022.
- [13] Margit Laja, "Põlevkivituhk, omadused ja käitumine vesikeskkonnas," 2005.
- [14] Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituut ja Tartu Ülikooli Geoloogia osakond, "PÕLEVKIVITUHKADE OHTLIKKUSE UURING," 2019.
- [15] EUROOPA KOMISJON, "KOMISJONI MÄÄRUS (EL) nr 1357/2014," 2014.
- [16] T. H. E. L. R. K. LEMBI-MERIKE RAADO*, "COMPOSITION AND PROPERTIES OF OIL SHALE ASH CONCRETE," 2014.
- [17] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 934-2:2009+A1:2012. Betooni, mördi ja süstmördi keemilised lisandid. Osa 2: Betooni keemilised lisandid. Määratlused, nõuded, vastavus, tähistus ja sildistus," Jul. 2012.
- [18] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12620:2005+A1:2008. Betooni täitematerjalid KONSOLIDEERITUD TEKST," 2009.
- [19] J. Kalbus, "Silikaatkivist täitematerjali mõju uurimine mördi omadustele Magistritöö," 2023.
- [20] by B. A. W. T. N.-M. Recovery, "Mineral Processing Technology ," 2006.
- [21] Betooni Meister AS, "BetooniMeister koduleht: https://betoonimeister.ee/betoon/betooni-klassid/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw_-GxBhC1ARIsADGgDjvycse00XO9y4IPs8IWvIxsNmAcFTdv-YHGW572nYzsoaDN-4ozQAEaAj-UEALw_wcB," 2024.
- [22] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12350-5:2019. Betoonisegu katsetamine. Osa 5: Valguvuskatse," 2019.

- [23] L. Y. S. C. Wei LI1 1Yantai International Airport Group Co., "Analysis of the Influence of Water-cement Ratio on Concrete Strength," 2021.
- [24] The Concrete Countertop Institute, "<https://concretecountertopinstitute.com/free-training/the-importance-of-water-cement-ratio-in-concrete-countertop-mix-design/>," 2024.
- [25] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 197-1:2011. Tsement. Osa 1: Harilike tsementide koostis, spetsifikatsioonid ja vastavuskriteeriumid," Oct. 2011.
- [26] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, ""EVS-EN 933-1:2012 - Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod," 2012.
- [27] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 1015-3:2004+A2:2007 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 3: Mõrdisegu konsistentsi määramine (raputuslual) KONSOLIDEERITUD TEKST," Jun. 2009.
- [28] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12350-6:2019. Betoonisegu katsetamine. Osa 6: Tihedus." Nov. 01, 2019.
- [29] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12390-7:2009. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 7: Kivistunud betooni tihedus," Dec. 2019.
- [30] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12390-3:2019. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus," Nov. 2019.
- [31] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12390-5:2019. Kivistunud betooni katsetamine. Osa 5: Katsekehade paindetõmbetugevus.," Dec. 2019.
- [32] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 1015-12:2004 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 12: Kivistunud krohvimördi ja aluspinna nakketugevuse määramine.," Jul. 2016.
- [33] American Society for Testing and Materials, "C307. Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing," Jun. 2023.

LISAD

Rohelisega märgitud number läheb keskmise tugevuse arvutamisel arvesse. Punasega on märgitud suur kõrvalekalle või praak-katsekehad – pragunenud katsekehad, vale purunemispilt või muu vastav põhjus.

1. Survetugevuse katsekehade tabel

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	T10e	3	26.01.2024	29.01.2024	1208,2	2188	2233	99,49	232,325	23,4	23,8
2					1212,4	2191	2239	98,41	238,637	24,2	
3					1225,4	2217,4	2235	99,83	336,463	33,7	
7		7		02.02.2024	1206	2188	2228	102,12	394,232	38,6	39,2
8					1235,8	2232,2	2240	100,1	395,511	39,5	
9					1234,2	2229,8	2240	100,42	397,572	39,6	
10		14		09.02.2024	1218,4	2215	2223	104,32	435,304	41,7	42,4
11					1244,8	2245,4	2244	101,46	444,186	43,8	
12					1216,2	2217	2215	102,76	429,265	41,8	
16		28		23.02.2024	1223,2	2235,8	2208	103,49	494,352	47,8	45,6
17					1192,2	2192,2	2192	101,77	441,131	43,3	
18					1258,6	2255,8	2262	99,74	524,622	52,6	
22		56		22.03.2024	1222	2231,8	2210	101,61	475,806	46,8	55,25
23					1231,4	2224,4	2240	99,62	575,996	57,8	
24	1254,4		2269		2236	102,3	538,833	52,7			
1	T10v	3	26.01.2024	29.01.2024	1265,8	2270,8	2260	100,77	389,045	38,6	38,1
2					1269,4	2285,2	2250	101,88	383,289	37,6	
3					1220,6	2233	2206	101,98	343,640	33,7	
7		7		02.02.2024	1240,8	2235	2248	99,88	404,607	40,5	40,7
8					1212,8	2201,8	2226	100,01	420,310	42,0	
9					1208,2	2222,6	2191	100,63	397,217	39,5	
10		14		09.02.2024	1196,2	2200,2	2191	100,52	458,042	45,6	44,6
11					1238,8	2232,4	2247	104,6	457,971	43,8	
12					1215,2	2222,8	2206	102,13	453,353	44,4	
16		28		23.02.2024	1227,2	2249	2201	104,82	465,501	44,4	45,3
17					1197,6	2207	2186	102,48	401,766	39,2	
18					1229	2250	2204	101,65	470,478	46,3	
22		56		22.03.2024	1258,8	2279,2	2234	102,6	506,219	49,3	50,0
23					1206,8	2219,4	2192	101,82	516,309	50,7	
24	1222,6		2221,6		2224	100,69	564,343	56,0			

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	T25e	3	29.01.2024	01.02.2024	1185,2	2206,8	2160	99,82	364,318	36,5	36,3
2					1162	2163,8	2160	101,4	366,876	36,2	
3					1236	2254,4	2214	100,51	408,939	40,7	
7		7		05.02.2024	1170,4	2187,2	2151	102,73	424,645	41,3	41,3
8					1228	2246,2	2206	102,76	233,987	22,8 - pragunenud	
9					1161,8	2158	2166	100,3	271,109	27,0 - pragunenud	
10		14		12.02.2024	1209,4	2221,6	2195	99,87	453,068	45,4	44,9
11					1197	2229,8	2159	104,32	463,940	44,5	
12					1238,8	2250,6	2224	102,45	458,327	44,7	
16		28		26.02.2024	1224,4	2262,2	2180	104,36	540,539	51,8	49,7
17					1208,6	2241,2	2170	102,15	485,754	47,6	
18					1167,8	2173,2	2162	100,56	410,504	40,8	
22		56		25.03.2024	1248,2	2270	2222	101,64	497,834	49,0	48,0
23					1185,4	2203,4	2164	102,49	482,699	47,1	
24	1181,4		2195,6		2165	102,35	395,726	38,7			
1	T25v	3	29.01.2024	01.02.2024	1165,8	2166,6	2165	100,02	299,017	29,9	30,7
2					1173,6	2186	2159	100,69	306,833	30,5	
3					1177	2175,6	2179	100,13	317,421	31,7	
7		7		05.02.2024	1199	2200,4	2197	101,27	409,936	40,5	39,5
8					1202,8	2214	2189	102,08	393,096	38,5	
9					1200	2127,2	2294	101,07	351,670	34,8	
10		14		12.02.2024	1226	2237,4	2212	105,67	440,562	41,7	43,0
11					1205,6	2205,2	2206	101,42	443,476	43,7	
12					1204,2	2202,8	2206	99,82	434,594	43,5	
16		28		26.02.2024	1183,2	2191,8	2173	101,14	466,072	46,1	46,6
17					1163,8	2186,6	2138	101,8	475,167	46,7	
18					1182	2200	2161	101,9	479,357	47,0	
22		56		25.03.2024	1186,4	2196,2	2175	101,29	486,394	48,0	49,2
23					1191,6	2197,4	2185	100,73	491,794	48,8	
24	1201,8		2115		2316	102	518,298	50,8			

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	P10e	3	03.02.2024	06.02.2024	1116,4	2122,6	2110	101,13	58,434	5,8	7,95
2					1159,6	2131,2	2193	100,93	79,977	7,9	
3					1128,4	2139,2	2116	101,48	81,037	8,0	
7		7		10.02.2024	1133,6	2156,2	2109	99,98	198,796	19,9	19,2
8					1124,8	2136,4	2112	102,45	193,455	18,9	
9					1131	2144,6	2116	104,64	197,443	18,9	
10		14		17.02.2024	1130	2144,6	2114	101,72	286,437	28,2	24,04
11					1126,2	2140,6	2110	101,53	250,695	24,7	
12					1136	2157,4	2112	102,29	245,481	24,0	
16		28		02.03.2024	1151	2170,4	2129	102,01	374,124	36,7	37,3
17					1163,8	2182	2143	103,03	393,096	38,2	
18					1142,4	2159	2124	101,24	376,043	37,1	
22		56		30.03.2024	1101,6	2158,8	2042	101,66	422,940	41,6	41,5
23					1134,6	2154,4	2113	100,44	414,058	41,2	
24	1130,2		2138		2121	99,71	414,058	41,5			
1	P10v	3	04.02.2024	07.02.2024	1060	2064,6	2055	102	41,121	4,0	3,9
2					1059,2	2067,2	2051	102,1	32,035	3,1	
3					1048,6	2049,2	2048	101,3	37,418	3,7	
7		7		11.02.2024	1079,8	2105,2	2053	102,31	120,489	11,8	12,1
8					1077	2103,6	2049	104,32	132,981	12,7	
9					1076,8	2098	2054	101,31	120,812	11,9	
10		14		18.02.2024	1081,2	2106,8	2054	102,85	187,711	18,3	17,9
11					1071,4	2095,2	2046	102,63	186,435	18,2	
12					1068,8	2092,4	2044	102,49	176,193	17,2	
16		28		03.03.2024	1069,2	2072,6	2066	100,9	226,427	22,4	23,3
17					1071,4	2078,4	2064	100,93	248,670	24,6	
18					1083,4	2107,8	2058	102,76	235,332	22,9	
22		56		31.03.2024	1066,2	2072,8	2059	101,48	275,489	27,1	26,7
23					1073,6	2088,2	2058	102,68	247,285	24,1	
24	1076,2		2085,8		2066	101,11	265,246	26,2			

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	P25e	3	03.02.2024	06.02.2024	1096,6	2108	2084	101,21	82,114	8,1	8,3
2					1100	2109	2090	101,1	85,571	8,5	
3					1108,2	2119,6	2096	102,28	85,194	8,3	
7		7		10.02.2024	1112,4	2123,8	2100	99,89	186,774	18,7	19,0
8					1117,8	2133	2101	101,32	196,530	19,4	
9					1114,4	2129,2	2098	100,56	216,446	21,5	
10		14		17.02.2024	1113,8	2122,4	2104	101,3	309,961	30,6	31,1
11					1114,8	2131,6	2096	101,2	315,288	31,2	
12					1115,6	2135	2094	101,76	321,756	31,6	
16		28		02.03.2024	1111,8	2137,6	2084	101,13	371,211	36,7	39,0
17					1115,2	2127,6	2102	101,2	401,126	39,6	
18					1126,2	2148,8	2101	101,65	412,424	40,6	
22		56		30.03.2024	1072,8	2087	2058	100,26	361,900	36,1	35,8
23					1121	2135,8	2105	102,82	381,727	37,1	
24	1125,4		2146,8		2102	102,73	350,105	34,1			
1	T10ef	3	30.01.2024	02.02.2024	1208,5	2203,6	2214	102,12	364,962	35,7	34,1
2					1194	2191	2198	100,33	325,374	32,4	
3					1174,6	2164,8	2186	101,52	300,223	29,6	
7		7		06.02.2024	1179,2	2196,6	2159	102,58	362,471	35,3	36,9
8					1207	2208,4	2205	101,01	388,549	38,5	
9					1146,6	2136,6	2158	100,66	329,43	32,7	
10		14		13.02.2024	1140,6	2135,2	2147	100	401,197	40,1	38,2
11					1190,4	2207,8	2170	101,77	368,22	36,2	
12					1171,8	2177	2166	101,13	425,641	42,1	
16		28		27.02.2024	1211,4	2205,8	2218	101,3	474,314	46,8	45,7
17					1212,6	2223,4	2200	102,14	458,468	44,9	
18					1218,4	2214	2224	103,16	469,695	45,5	
22		56		26.03.2024	1180	2179	2181	100,44	492,433	49,0	48,9
23					1196,6	2189,4	2205	100,09	491,509	49,1	
24	1212		2227,2		2194	101,98	494,636	48,5			

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	T10vf	3	30.01.2024	02.02.2024	1177,2	2168,2	2188	99,87	326,374	32,7	33,7
2					1220,4	2211,4	2231	99,67	351,954	35,3	
3					1179	2162,2	2199	99,98	331,845	33,2	
7		7		06.02.2024	1209,8	2199	2223	100,27	405,877	40,5	38,7
8					1177,4	2173,2	2182	100,84	372,277	36,9	
9					1183,6	2185,6	2181	101,31	321,543	31,7	
10		14		13.02.2024	1209,2	2195,4	2226	100,51	436,654	43,4	41,9
11					1178,8	2157,4	2205	99,23	395,015	39,8	
12					1202	2189	2218	99,01	418,961	42,3	
16		28		27.02.2024	1148,6	2140,2	2158	98,11	371,493	37,9	43,5
17					1150,2	2130,8	2173	102,11	428,98	42,0	
18					1212,4	2214	2210	100,65	453,565	45,1	
22		56		26.03.2024	1198,4	2203	2193	100,78	481,917	47,8	47,3
23					1212,6	2208,8	2217	100,49	402,263	40,0	
24	1159,6		2148,2		2173	99,83	466,711	46,8			
1	T25ef	3	30.01.2024	02.02.2024	1169,2	2178,6	2158	98,45	321,542	32,7	33,9
2					1211,2	2229,2	2190	99,54	370,073	37,2	
3					1180,8	2193	2167	100,21	351,741	35,1	
7		7		06.02.2024	1206,6	2211,2	2201	102,25	399,491	39,1	39,0
8					1161,4	2172,6	2149	102,41	388,62	37,9	
9					1175,4	2193,6	2154	102,53	411,287	40,1	
10		14		13.02.2024	1193,6	2204,6	2181	101,56	443,973	43,7	41,5
11					1132	2131	2133	100,41	394,873	39,3	
12					1207,2	2241,8	2167	102,73	269,061	26,2	
16		28		27.02.2024	1190	2219,2	2156	100,4	420,453	41,9	44,1
17					1211	2233,2	2185	99,88	441,199	44,2	
18					1216,4	2238,8	2190	102,3	473,388	46,3	
22		56		26.03.2024	1224,4	2250,4	2193	103,23	533,859	51,7	50,8
23					1202,2	2203,2	2201	100,88	513,537	50,9	
24	1178,8		2182,6		2174	100,21	499,326	49,8			

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	T25vf	3	30.01.2024	02.02.2024	1194,8	2213,8	2173	102,25	334,758	32,7	31,8
2					1180,8	2200	2159	101,33	313,726	31,0	
3					1190	2211,4	2165	99,64	248,118	24,9	
7		7		06.02.2024	1192,2	2195,8	2188	101,28	403,286	39,8	33,4
8					1198,8	2214,4	2180	102,29	317,118	31,0	
9					1200,6	2214,2	2184	101,85	364,303	35,8	
10		14		13.02.2024	1159,6	2147,8	2173	99,71	435,447	43,7	45,7
11					1179,2	2193,8	2162	102,15	360,979	35,3	
12					1214,6	2231,8	2194	101,57	484,902	47,7	
16		28		27.02.2024	1185,6	2182	2190	100,39	486,82	48,5	47,0
17					1204	2198,2	2211	102,33	494,137	48,3	
18					1205,2	2208,8	2201	103,01	456,518	44,3	
22		56		26.03.2024	1201,6	2215,2	2185	101,83	405,887	39,9	41,6
23					1188	2202,6	2171	101,3	469,269	46,3	
24	1188,8		2213,6		2160	102,67	445,252	43,4			
1	P10ef	3	02.02.2024	05.02.2024	1107,4	2119,4	2094	102,52	89,703	8,7	8,6
2					1108,6	2112	2105	101,12	87,979	8,7	
3					1104,8	2104	2106	101,1	83,164	8,2	
7		7		09.02.2024	1130,6	2152,6	2106	104,52	186,31	17,8	17,8
8					1146,2	2170,6	2119	103,12	191,144	18,5	
9					1100,4	2123	2076	101,23	171,424	16,9	
10		14		16.02.2024	1127,6	2154,4	2098	102,74	320,761	31,2	31,3
11					1128,8	2141	2115	100,46	303,282	30,2	
12					1156,2	2183,2	2126	103,01	333,552	32,4	
16		28		01.03.2024	1127,8	2145,8	2108	101,1	350,32	34,7	34,4
17					1147,4	2165	2128	102,76	337,104	32,8	
18					1160,4	2183,2	2135	102,76	366,306	35,6	
22		56		29.03.2024	1140	2165,4	2112	102,96	384,427	37,3	38,5
23					1160,4	2182,4	2135	102,95	451,504	43,9	
24	1127,6		2145,4		2108	102,57	407,591	39,7			

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	P10vf	3	02.02.2024	05.02.2024	1125,2	2147	2101	103,06	75,145	7,3	7,3
2					1130,2	2155,6	2102	102,88	74,983	7,3	
3					1130	2139,6	2119	101,28	83,551	8,2	
7		7		09.02.2024	1137,6	2167	2105	101,45	198,402	19,6	19,0
8					1137,2	2163,2	2108	104,52	189,01	18,1	
9					1126,8	2162,8	2088	98,89	192,533	19,5	
10		14		16.02.2024	1134,4	2151,6	2115	101,36	325,522	32,1	26,75
11					1126,6	2145,4	2106	101,47	276,195	27,2	
12					1125	2141,4	2107	101,25	266,376	26,3	
16		28		01.03.2024	1135,5	2155,2	2114	101,7	290,464	28,6	28,7
17					1136,8	2156	2115	101,5	254,368	25,1	
18					1136	2159,2	2110	103,03	297,528	28,9	
22		56		29.03.2024	1132,8	2161,2	2102	101,15	252,39	25,0	38,3
23					1123,2	2148,2	2096	101,32	377,606	37,3	
24	1128,2		2152,8		2101	101,5	398,638	39,3			
1	P25ef	3	02.02.2024	05.02.2024	1077,8	2087	2068	101,78	67,583	6,6	6,5
2					1102,2	2128,4	2074	103,77	69,174	6,7	
3					1095,2	2117	2072	102,76	64,965	6,3	
7		7		09.02.2024	1071,8	2088,8	2054	103,64	142,798	13,8	14,5
8					1090,2	2115,2	2064	102,57	154,379	15,1	
9					1072,6	2088,8	2056	101,25	148,803	14,7	
10		14		16.02.2024	1094,8	2114,6	2074	101,24	270,756	26,7	27,4
11					1097,2	2115	2078	100,85	283,683	28,1	
12					1088,2	2104,4	2071	101,6	202,835	20,0	
16		28		01.03.2024	1113,4	2135,2	2090	102,04	302,002	29,6	31,1
17					1112,2	2142,4	2080	102,8	326,019	31,7	
18					1105,4	2124,4	2085	102,09	327,298	32,1	
22		56		29.03.2024	1092,8	2112,2	2072	102,35	375,687	36,7	35,2
23					1086	2101,2	2070	102,02	344,138	33,7	
24	1109,6		2127,4		2090	101,49	313,158	30,9			

Katsekeha tähis	Retsept	Vanus	Valmistatud	Katsetatud	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus, kg/m ³	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine tugevus, MPa
1	P25vf	3	02.02.2024	05.02.2024	1103	2129,2	2075	103,57	69,789	6,7	6,9
2					1082,6	2100	2064	102,47	68,682	6,7	
3					1107,2	2133,4	2079	102,89	74,868	7,3	
7		7		09.02.2024	1117,6	2141,6	2091	100,89	173,822	17,2	17,1
8					1098,2	2126,8	2068	99,58	171,548	17,2	
9					1102,6	2128	2075	103,08	174,103	16,9	
10		14		16.02.2024	1095,2	2113,4	2076	101,96	259,242	25,4	25,2
11					1092,6	2117,8	2066	101,57	268,99	26,5	
12					1098,6	2102,8	2094	99,17	233,569	23,6	
16		28		01.03.2024	1086,2	2095,2	2077	100,76	249,435	24,8	33,5
17					1116	2141	2089	101,63	340,23	33,5	
18					1105,4	2116	2094	100,89	310,671	30,8	
22		56		29.03.2024	1119,8	2128,4	2110	101,22	426,066	42,1	40,1
23					1107,4	2124,8	2088	101,98	368,439	36,1	
24	1101,1		2113,2		2088	101,9	387,838	38,1			

2. Paindetugevuse katsekehade tabel

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Proovikeha mõõtmed			Purustav jõud, kN			Paindetugevus MPa	Survetugevus, MPa		Keskmine paindetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa
							pikkus	laius	kõrgus	Paindel	Survel 1	Survel 2		Survel 1	Survel 2		
1	T10E	26.01.2024	02.02.2024	7	309,8	572,8	161,11	40,11	41,15	3,175	50	51	7,4	31,3	31,9	7,9	33,3
2					323,8	589,8	160,03	41,15	40,23	3,45	57	59	8,1	35,6	36,9		
3					324,4	591,8	160,63	39,88	40,67	3,55	55	57	8,3	34,4	35,6		
4			23.02.2024	28	322,6	585,8	160,36	40,87	40,62	4,45	80	75	10,4	50,0	46,9	9,9	46,9
5					319	584,6	161,72	42,32	42,80	4,025	70	66	9,4	43,8	41,3		
6					322	591,4	160,78	41,21	41,70	3,75	64	63	8,8	40,0	39,4		
7			22.03.2024	56	315,8	581,6	161,66	40,14	42,93	4,05	77	79	9,5	48,1	49,4	9,8	49,1
8					323,4	594,4	160,66	40,54	43,86	4,15	78	78	9,7	48,8	48,8		
9					317	582	161,17	39,78	42,80	4,3	83	76	10,1	51,9	47,5		
1	T10V	26.01.2024	02.02.2024	7	311,2	576,2	160,14	40,45	41,77	3,6	57	39	8,4	35,6	24,4	8,4	35,6
2					322	590,4	161,12	40,34	41,28	3,65	58	51	8,6	36,3	31,9		
3					309,4	570,2	160,54	41,23	41,38	3,5	57	56	8,2	35,6	35,0		
4			23.02.2024	28	316,6	580,2	160,82	40,82	42,87	3,9	68	69,5	9,1	42,5	43,4	8,9	44,1
5					317,6	583,2	161,32	41,79	41,65	3,875	73	70	9,1	45,6	43,8		
6					310,8	569	160,47	40,89	40,72	3,6	71	72	8,4	44,4	45,0		
7			22.03.2024	56	325,4	589,4	160,82	40,52	41,81	4,4	86	90	10,3	53,8	56,3	10,7	54,2
8					326,4	593,8	160,54	40,23	42,30	4,8	83	83	11,3	51,9	51,9		
9					327	591,8	160,76	40,99	41,21	4,5	91	87	10,5	56,9	54,4		
1	T25e	29.01.2024	05.02.2024	7	308,2	572,6	160,44	41,87	40,14	3,75	64	58	8,8	40,0	36,3	8,5	37,3
2					310,4	572,6	160,89	40,30	40,54	3,55	58	61	8,3	36,3	38,1		
3					309,8	580	161,13	40,16	40,22	3,55	57	50	8,3	35,6	31,3		
4			26.02.2024	28	314,6	574,8	160,91	40,09	41,75	4,15	74	73	9,7	46,3	45,6	9,8	45,3
5					317,4	582,8	160,68	40,30	42,69	4,1	72	64	9,6	45,0	40,0		
6					316,6	587,8	161,82	40,33	42,29	4,35	74	69	10,2	46,3	43,1		
7			25.03.2024	56	313,8	579,6	161,72	40,16	42,42	4,6	83	83	10,8	51,9	51,9	10,3	52,7
8					317,6	586,2	161,87	41,14	42,22	4,35	85	84	10,2	53,1	52,5		
9					315,4	576,8	160,94	40,75	42,15	4,2	84	87	9,8	52,5	54,4		

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Proovikeha mõõtmed			Purustav jõud, kN			Paindetugevus MPa	Survetugevus, MPa		Keskmine paindetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa
							pikkus	laius	kõrgus	Paindel	Survel 1	Survel 2		Survel 1	Survel 2		
1	T25V	29.01.2024	05.02.2024	7	305,2	573,6	160,45	41,43	41,21	3,75	59	52	8,8	36,9	32,5	8,8	35,3
2					306,2	579,8	159,99	39,89	40,47	3,75	58	56	8,8	36,3	35,0		
3					300	567,4	160,12	40,15	41,85	3,3	56	53	7,7	35,0	33,1		
4			26.02.2024	28	311,6	574,6	160,90	39,83	41,99	3,9	73	67	9,1	45,6	41,9	9,1	42,5
5					304,4	564	161,64	40,30	41,15	3,75	67	66	8,8	41,9	41,3		
6					311,8	577,8	161,77	40,41	41,64	4	69	66	9,4	43,1	41,3		
7			25.03.2024	56	313,2	576,8	160,43	39,83	42,29	4,5	80	81	10,5	50,0	50,6	10,5	51,0
8					319,8	589,6	161,34	40,65	42,43	4,35	83	94	10,2	51,9	58,8		
9					318,6	586,8	160,76	40,43	42,29	4,55	81	83	10,7	50,6	51,9		
1	P10E	03.01.2024	10.02.2024	7	300,2	567,8	161,23	42,35	39,43	2,2	26	26	5,2	16,3	16,3	5,1	15,3
2					308,6	582,8	160,52	43,65	42,14	2,15	23	24	5,0	14,4	15,0		
3					301	590	159,53	40,23	40,32	1,95	23	23,5	4,6	14,4	14,7		
4			02.03.2024	28	298,2	563	161,41	40,43	42,25	2,85	65	65	6,7	40,6	40,6	6,9	39,2
5					312,4	588,6	161,21	40,46	43,66	3,1	65	63	7,3	40,6	39,4		
6					309	582,6	161,19	40,75	43,73	2,9	59	59	6,8	36,9	36,9		
7			30.03.2024	56	312,4	588	161,81	42,26	42,99	4	64	63	9,4	40,0	39,4	9,4	40,2
8					303,8	571,4	161,71	40,53	41,81	3,85	70	70	9,0	43,8	43,8		
9					303,4	570,4	160,85	40,58	43,09	4,2	57	66	9,8	35,6	41,3		
1	P10V	04.01.2024	11.02.2024	7	300,2	568,4	159,82	41,36	40,32	1,95	20,05	23	4,6	12,5	14,4	4,5	12,5
2					284,8	555,2	162,32	40,85	42,89	1,75	15	14	4,1	9,4	8,8		
3					279	542,8	160,21	42,95	43,23	1,9	15,5	16	4,5	9,7	10,0		
4			03.03.2024	28	297,4	560,4	161,01	39,91	41,62	3,2	55	56	7,5	34,4	35,0	7,5	34,7
5					281,8	547	161,03	39,81	43,05	2,15	38	39	5,0	23,8	24,4		
6					281,6	546,6	161,23	40,41	41,55	2,45	39	39	5,7	24,4	24,4		
7			31.03.2024	56	281,4	545,8	160,78	41,06	41,32	2,6	45	44	6,1	28,1	27,5	6,1	27,5
8					275,6	533,6	161,16	40,20	41,91	3,1	46	41	7,3	28,8	25,6		
9					302,4	567,6	160,91	40,81	41,52	3,85	64	63	9,0	40,0	39,4		

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Proovikeha mõõtmed			Purustav jõud, kN			Paindetugevus MPa	Survetugevus, MPa		Keskmine paindetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa		
							pikkus	laius	kõrgus	Paindel	Survel 1	Survel 2		Survel 1	Survel 2				
1	P25E	03.01.2024	10.02.2024	7	294,2	563,4	159,89	40,31	39,98	1,95	25	24	4,6	15,6	15,0	4,7	15,2		
2					293,6	562,4	160,32	41,46	42,35	2,05	22	24	4,8	13,8	15,0				
3					290,8	560	161,53	42,67	41,56	2,3	24	27	5,4	15,0	16,9				
4			02.03.2024	28	302	573,6	161,16	40,14	43,23	3	57	57	7,0	35,6	35,6	7,3	34,2		
5					304	579,4	160,98	40,55	43,54	3,05	49	54	7,1	30,6	33,8				
6					302,6	575,2	161,53	40,79	42,17	3,25	47	51	7,6	29,4	31,9				
7			30.03.2024	56	286,2	544,6	161,62	39,11	41,89	3,2	68	64	7,5	42,5	40,0	7,5	40,9		
8					299,2	566,6	162,02	41,26	41,65	4,05	69	65	9,5	43,1	40,6				
9					292	554,4	161,29	40,38	41,41	4	65	62	9,4	40,6	38,8				
1	T10EF	30.01.2024	06.02.2024	7									0,0	0,0	0,0	Puudub	Puudub		
2															0,0			0,0	0,0
3																		0,0	0,0
4			27.02.2024	28	322,2	595	160,12	40,14	42,15	3,8	70	65	8,9	43,8	40,6	9,0	44,5		
5					320,6	589,8	160,53	41,14	41,87	3,9	73	73	9,1	45,6	45,6				
6					322,2	586,6	161,12	41,39	42,23	4,5	72	74	10,5	45,0	46,3				
7			26.03.2024	56	324	588,4	160,84	40,35	41,62	4,5	85	86	10,5	53,1	53,8	10,3	52,2		
8					321,4	593,6	161,3	41,37	42,75	4,25	77	79	10,0	48,1	49,4				
9					332,6	603	161,61	41,14	41,76	4,45	88	86	10,4	55,0	53,8				
1	T10VF	30.01.2024	06.02.2024	7	319,4	588,2	161,29	40,03	39,94	3,55	54	53	8,3	33,8	33,1	8,2	34,2		
2					304,6	563	161,41	39,21	39,16	3,25	58	58	7,6	36,3	36,3				
3					328,2	601,8	161,06	41,86	39,9	3,7	54	51	8,7	33,8	31,9				
4			27.02.2024	28	329,4	605	161,21	40,33	40,14	4,1	73	72	9,6	45,6	45,0	9,6	45,2		
5					313,8	578,4	161,55	41,23	42,12	5,4	71	71	12,7	44,4	44,4				
6					313,4	579,2	160,38	39,89	39,42	3,65	74	73	8,6	46,3	45,6				
7			26.03.2024	56	313,6	576,2	162,1	39,85	41,44	4	80	78	9,4	50,0	48,8	9,8	50,0		
8					311,6	572,8	161,3	39,96	41,47	4,1	85	81	9,6	53,1	50,6				
9					315,4	578,8	161,02	40,45	41,78	4,4	80	76	10,3	50,0	47,5				

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Proovikeha mõõtmed			Purustav jõud, kN			Paindetugevus MPa	Survetugevus, MPa		Keskmine paindetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa		
							pikkus	laius	kõrgus	Paindel	Survel 1	Survel 2		Survel 1	Survel 2				
1	T25ef	30.01.2024	06.02.2024	7	304	566,6	160,92	41,29	39,86	3,8	61	63	8,9	38,1	39,4	8,6	37,5		
2					300,4	560,4	161,31	41,55	39,03	3,25	57	61	7,6	35,6	38,1				
3					317,6	588	161,12	42,81	40,08	3,55	58	60	8,3	36,3	37,5				
4			27.02.2024	28	321,8	593,4	161,11	40,22	41,11	4,25	77	76	10,0	48,1	47,5	10,0	46,1		
5					306,8	572	160,14	41,13	42,38	4,25	75	72	10,0	46,9	45,0				
6					311,8	574,4	160,81	40,67	40,78	3,8	72	71	8,9	45,0	44,4				
7			26.03.2024	56	310	576,2	161,9	40,5	41,87	4,35	82	80	10,2	51,3	50,0	10,1	52,1		
8					308,2	571,6	160,75	41,68	42,09	4,2	84	85	9,8	52,5	53,1				
9					312	578,8	160,92	41,12	42,24	4,35	88	81	10,2	55,0	50,6				
1	T25VF	30.01.2024	06.02.2024	7									0,0	0,0	0,0	Puudub	Puudub		
2															0,0			0,0	0,0
3																		0,0	0,0
4			27.02.2024	28	321,4	592,8	160,23	41,29	41,67	4,2	75	79	9,8	46,9	49,4	9,8	46,0		
5					313,8	583	161,13	39,96	42,39	4,15	72	73	9,7	45,0	45,6				
6					308	573	161,77	39,56	40,01	3,7	71	72	8,7	44,4	45,0				
7			26.03.2024	56	323,6	595	160,64	40,83	42,85	4,9	81	84	11,5	50,6	52,5	11,5	49,0		
8					303,6	565,6	161,41	40,53	41,49	4,35	77	75	10,2	48,1	46,9				
9					312	580,2	162,47	41,31	42,76	3,75	73	80	8,8	45,6	50,0				
1	P10ef	02.01.2024	09.02.2024	7	301,6	575,8	159,76	41,25	43,21	3,475	21,5	21	8,1	13,4	13,1	8,1	12,8		
2					297,8	565,8	161,54	40,29	40,89	2,1	18,5	19	4,9	11,6	11,9				
3					307,4	583,6	160,53	43,69	42,65	1,55	20	19,5	3,6	12,5	12,2				
4			01.03.2024	28	302,6	573,2	162,07	40,08	42,63	3,15	58	54	7,4	36,3	33,8	7,3	34,4		
5					308,2	585	161,88	40,88	43,56	3,1	57	52	7,3	35,6	32,5				
6					306,2	578	162,3	40,35	43,51	3,55	56	53	8,3	35,0	33,1				
7			29.03.2024	56	309,2	586	161,78	41,17	43,42	4,2	65	63	9,8	40,6	39,4	9,6	41,4		
8					309,4	583,2	160,97	40,36	43,7	3,9	69	66	9,1	43,1	41,3				
9					307,6	583	162,77	40,07	43,62	4,15	68	66	9,7	42,5	41,3				

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Proovikeha mõõtmised			Purustav jõud, kN			Paindetugevus MPa	Survetugevus, MPa		Keskmise paindetugevus, MPa	Keskmise survetugevus, MPa
							pikkus	laius	kõrgus	Paindel	Survel 1	Survel 2		Survel 1	Survel 2		
1	P10VF	02.01.2024	09.02.2024	7	296,4	565,6	162,45	41,56	42,52	1,875	23,5	22	4,4	14,7	13,8	4,5	14,4
2					298,4	570,4	160,2	42,89	41,23	2,1	23,5	23,5	4,9	14,7	14,7		
3					298,6	570,6	159,89	43,56	42,56	2	23	23	4,7	14,4	14,4		
4			01.03.2024	28	300,4	570	161,19	40,32	43,33	3,35	55	58	7,9	34,4	36,3	8,0	34,9
5					298,8	566,8	160,87	40,24	43,75	3,5	57	54	8,2	35,6	33,8		
6					306,2	584,6	161,18	41,45	43,37	3,4	55	49	8,0	34,4	30,6		
7			29.03.2024	56	300	569,2	161,45	40,11	42,42	3,7	70	68	8,7	43,8	42,5	8,7	42,7
8					304,2	576,2	162,09	40,29	43,18	3,5	62	61	8,2	38,8	38,1		
9					303,2	575,2	161,46	40,01	43,64	3,9	57	67	9,1	35,6	41,9		
1	P25ef	02.01.2024	09.02.2024	7	282,6	545	160,89	41,56	40,76	1,85	23	22	4,3	14,4	13,8	4,16	13,4
2					300,4	575	161,14	42,67	43,67	0,9	18	20	2,1	11,3	12,5		
3					291,4	561,8	160,89	43,78	41,56	1,7	21	20	4,0	13,1	12,5		
4			01.03.2024	28	288,8	554,2	161,15	40,37	41,77	3,1	50	49	7,3	31,3	30,6	7,5	31,8
5					290	559,4	161,88	40,56	42,01	3,35	53	54	7,9	33,1	33,8		
6					301,8	576,4	161,08	40,14	43,41	3,1	51	48	7,3	31,9	30,0		
7			29.03.2024	56	299	567,4	161,21	40,61	42,16	1,7	67	67	4,0	41,9	41,9	4,0	40,4
8					295,2	564,6	161,07	40,64	42,32	4	64	64	9,4	40,0	40,0		
9					286,6	549,8	161,26	39,77	41,85	3,65	63	63	8,6	39,4	39,4		
1	P25VF	02.01.2024	09.02.2024	7	292	564,8	162,84	42,35	42,67	1,95	19	21	4,6	11,9	13,1	4,5	11,8
2					300,2	576	159,83	41,24	40,21	1,85	18	19	4,3	11,3	11,9		
3					295,8	567,4	160,82	42,67	39,98	1,925	19	19,5	4,5	11,9	12,2		
4			01.03.2024	28	294,8	565,8	161,67	39,96	44,3	2,7	48	47	6,3	30,0	29,4	6,3	30,9
5					303,2	582,6	161,97	41,13	42,74	3,45	52	53	8,1	32,5	33,1		
6					296,2	568	160,89	41,65	42,82	3,4	47	57	8,0	29,4	35,6		
7			29.03.2024	56	305,2	584,8	161,48	41,62	43,23	3,9	63	62	9,1	39,4	38,8	9,3	39,0
8					291,6	559,2	161,1	40,11	42,88	4,05	69	58	9,5	43,1	36,3		
9					288	550,6	162,07	39,37	42,36	3,45	65	64	8,1	40,6	40,0		

3. Nakketugevuse katsekehade tabel

Katsekeha number	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus päevades	Purustav jõud, N	Purustav pinge, MPa	Keskmine tõmbetugevus, MPa	
4	T10e	29.01.2024	02.02.2024	7		2,83	2,78	
5						2,87		
6						2,63		
13			23.02.2024	28		1,84	1,73	
14						1,76		
15						1,59		
19			22.03.2024	56		4717	2,40	2,74
20						5498	2,80	
21						5954	3,03	
4	T10v	29.01.2024	02.02.2024	7		2,81	2,69	
5						3,23		
6						2,04		
13			23.02.2024	28		2,25	2,12	
14						2,14		
15						1,98		
19			22.03.2024	56		5766	2,94	2,70
20						5486	2,79	
21						4648,7	2,37	
4	T25e	05.02.2024	05.02.2024	7		2,26	2,32	
5						2,36		
6						2,33		
13			26.02.2024	28		Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	2,08
14						2,08		
15						Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	
19			25.03.2024	56		5308	2,70	2,77
20						5761	2,93	
21						5245	2,67	

Katsekeha number	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus päevades	Purustav jõud, N	Purustav pinge, MPa	Keskmine tõmbetugevus, MPa	
4	T25v	05.02.2024	05.02.2024	7		1,82	1,78	
5						1,85		
6						1,68		
13			26.02.2024	28	Ebaõnnestus		Ebaõnnestus	1,90
14						1,79		
15						2,01		
19			25.03.2024	56	5987		3,05	2,65
20					4994		2,54	
21					4630		2,36	
4	P10E	03.01.2024	10.02.2024	7		1,82	1,94	
5						2,02		
6						1,99		
13			02.03.2024	28	2611		1,33	1,43
14					2564		1,31	
15					3263		1,66	
19			30.03.2024	56	6092		3,10	2,41
20					3191		1,63	
21					4927		2,51	
4	P10V	04.01.2024	11.02.2024	7		1,40	1,46	
5						1,53		
6						1,46		
13			03.03.2024	28	1953		0,99	0,98
14					1789		0,91	
15					2022		1,03	
19			31.03.2024	56	4326		2,20	1,92
20					3806		1,94	
21					3198		1,63	

Katsekeha number	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus päevades	Purustav jõud, N	Purustav pinge, MPa	Keskmine tõmbetugevus, MPa
4	P25E	03.01.2024	10.02.2024	7		1,94	1,81
5						1,88	
6						1,62	
13			02.03.2024	28	1998	1,02	1,15
14					2424	1,23	
15					2362	1,20	
19			30.03.2024	56	4423	2,25	1,74
20					2853	1,45	
21					2947	1,50	
4			T10ef	30.01.2024	06.02.2024	7	
5		2,00					
6		2,40					
13	27.02.2024	28			Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	Ebaõnnestus
14					Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	
15					Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	
19	26.03.2024	56			5206	2,65	2,63
20					5111	2,60	
21					5165	2,63	
4	T10vf	30.01.2024			06.02.2024	7	
5				2,13			
6			Ebaõnnestus	Ebaõnnestus			
13			27.02.2024	28		1,95	1,74
14						1,19	
15						2,07	
19			26.03.2024	56	5216	2,66	2,81
20					5819	2,96	
21					Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	

Katsekeha number	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus päevades	Purustav jõud, N	Purustav pinge, MPa	Keskmine tõmbetugevus, MPa
4	T25ef	30.01.2024	06.02.2024	7	Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	2,40
5						2,34	
6						2,46	
13			27.02.2024	28		1,93	1,98
14						1,93	
15						2,07	
19			26.03.2024	56	3404	1,73	2,56
20					5573	2,84	
21					6074	3,09	
4	T25vf	30.01.2024	06.02.2024	7		2,26	2,39
5					Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	
6						2,52	
13			27.02.2024	28		0,87	1,19
14					Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	
15						1,51	
19			26.03.2024	56	4754	2,42	2,42
20					5439	2,77	
21					4084	2,08	
4	P10ef	02.01.2024	09.02.2024	7		1,68	1,90
5						1,75	
6						2,26	
13			01.03.2024	28	2497	1,27	1,50
14					Ebaõnnestus	Ebaõnnestus	
15					3375	1,72	
19			29.03.2024	56	4215	2,15	2,77
20					6244	3,18	
21					5862	2,99	

Katsekeha number	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus päevades	Purustav jõud, N	Purustav pinge, MPa	Keskmine tõmbetugevus, MPa	
4	P10VF	02.01.2024	09.02.2024	7		1,26	1,62	
5						1,79		
6						1,82		
13			01.03.2024	28	Ebaõnnestus		Ebaõnnestus	1,25
14					3431	1,75		
15					1473	0,75		
19			29.03.2024	56		3967	2,02	2,57
20						5516	2,81	
21						5670	2,89	
4	P25ef	02.01.2024	09.02.2024	7		1,54	1,71	
5						1,64		
6						1,95		
13			01.03.2024	28		2670	1,36	1,43
14						2980	1,52	
15						2799	1,43	
19			29.03.2024	56		4011	2,04	2,39
20						5325	2,71	
21						4721	2,40	
4	P25VF	02.01.2024	09.02.2024	7		1,73	1,59	
5						1,29		
6						1,76		
13			01.03.2024	28		2003	1,02	1,39
14						3549	1,81	
15						2639	1,34	
19			29.03.2024	56		5652	2,88	2,46
20						4236	2,16	
21						4601	2,34	

4. Tõmbetugevuse katsekehade tabel

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Laius, mm	Paksus, mm	Pindala, mm ²	Purustav jõud, N	Purustav tõmbepinge, MPa	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus kg/m ³	Keskmine tõmbetugevus MPa	Keskmine tihedus kg/m ³
1	T10e	26.01.2024	22.02.2024	28	23,36	23,29	544,0544	2 190	4,03	84,4	152,8	2234	3,86	2242
2					23,6	23,44	553,184	2010	3,63	84,6	153	2237		
3					23,2	23,02	534,064	2 100	3,93	85,8	154,6	2247		
4			22.03.2024	56	22,72	24,6	558,912	1 460	2,61	87,6	158,6	2234	3,59	2255
5					22,55	23,5	529,925	1970	3,72	87,6	157,4	2255		
6					22,94	23,44	537,7136	1 860	3,46	86,8	156	2254		
1	T10v	26.01.2024	22.02.2024	28	22,31	24,18	539,4558	2 290	4,25	82,6	148,4	2255	4,21	2239
2					23,37	23,81	556,4397	2320	4,17	85,4	154,2	2241		
3					29,87	23,11	690,2957	1 630	2,36	88	159,2	2236		
4			22.03.2024	56	21,93	24,22	531,1446	1 780	3,35	84,8	152,6	2251	3,35	2248
5					25,23	23,47	592,1481	2430	4,10	88,2	159,2	2242		
6					27,07	23,71	641,8297	1 720	2,68	90	161,8	2253		
1	T25e	29.01.2024	26.02.2024	28	24,62	24,28	597,7736	2 700	4,52	86,6	157,8	2216	4,37	2190
2					24,55	23,53	577,6615	2440	4,22	84,4	155,2	2192		
3					27,53	24,49	674,2097	2 300	3,41	87	160,2	2189		
4			25.03.2024	56	23,2	24,71	573,272	2 940	5,13	89,8	163	2227	3,46	2231
5					23,17	24,43	566,0431	1930	3,41	87	157,8	2229		
6					23,15	25,68	594,492	2 090	3,52	88,8	160,8	2233		
1	T25v	29.01.2024	26.02.2024	28	19,75	26,44	522,19	2 540	4,86	77,6	143,6	2176	4,75	2171
2					24,26	24,83	602,3758	2790	4,63	81,4	150,8	2173		
3					31,3	26,3	823,19	1 870	2,27	89,6	166,2	2170		
4			25.03.2024	56	18,41	25,38	467,2458	1 880	4,02	74,4	137	2188	4,06	2200
5					21,94	26,86	589,3084	1500	2,55	85,8	157,2	2202		
6					24,44	24,73	604,4012	2 470	4,09	82,2	150,8	2198		
1	P10e	03.02.2024	26.02.2024	28	26	24,9	647,4	1 580	2,44	82,6	154,6	2147	2,39	2142
2					24,52	24,63	603,9276	2350	3,89	79,8	150	2137		
3					26,95	24,88	670,516	1 570	2,34	79,4	148,6	2147		
4			25.03.2024	56	23,02	25,8	593,916	1 950	3,28	75,8	141,4	2155	3,13	2149
5					23,43	25,71	602,3853	1790	2,97	79,4	149	2141		
6					23,3	26,06	607,198	1 480	2,44	81	151	2157		

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Laius, mm	Paksus, mm	Pindala, mm ²	Purustav jõud, N	Purustav tõmbepinge, MPa	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus kg/m ³	Keskmine tõmbetugevus MPa	Keskmine tihedus kg/m ³
1	P10v	04.02.2024	02.03.2024	28	25,42	24,56	624,3152	1 130	1,81	78,2	146,6	2143	1,81	2135
2					25,3	24,47	619,091	1570	2,54	78,8	148	2139		
3					22,59	24,27	548,2593	1 680	3,06	70,6	133	2131		
4			30.03.2024	56	22,04	25,19	555,1876	1 160	2,09	81,2	152,2	2144	2,09	2152
5					26,2	25,3	662,86	2110	3,18	78,2	146	2153		
6					22,88	24,55	561,704	1 030	1,83	76	142	2152		
1	P25e	03.02.2024	26.02.2024	28	21,72	25,1	545,172	1 470	2,70	72,6	137	2127	2,65	2127
2					26,59	24,8	659,432	1660	2,52	75,2	142	2126		
3					22,97	24,08	553,1176	1 520	2,75	71,8	135,4	2129		
4			25.03.2024	56	21,9	25,65	561,735	2 240	3,99	73,6	139,4	2119	3,99	2138
5					22,93	24,55	562,9315	1670	2,97	73,6	138,2	2139		
6					22,6	22,8	515,28	1 550	3,01	72,8	136,8	2138		
1	T10ef	30.01.2024	27.02.2024	28	26,01	23,77	618,2577	1 390	2,25	86,8	148,4	2409	2,25	2378
2					26,75	25,42	679,985	2600	3,82	90,4	156	2378		
3					30,03	24,1	723,723	1 930	2,67	81,8	154,8	2121		
4			26.03.2024	56	22,39	23,4	523,926	2 370	4,52	81	145,6	2254	4,52	2261
5					23,6	25,26	596,136	2040	3,42	86	154,6	2254		
6					22,03	25,28	556,9184	2 900	5,21	85,2	152,4	2268		
1	T10vf	30.01.2024	27.02.2024	28	25,35	25,13	637,0455	2 070	3,25	96,8	165,6	2407	3,25	2321
2					23,72	24,77	587,5444	2110	3,59	95,2	161,8	2429		
3					23,5	24,64	579,04	1 380	2,38	89,2	162,8	2212		
4			26.03.2024	56	23,5	24,62	578,57	1 900	3,28	89,8	161,2	2258	3,36	2240
5					25,71	24,97	641,9787	2200	3,43	90,4	163,6	2235		
6					23,35	25,44	594,024	2 540	4,28	91,6	165,2	2245		
1	T25ef	30.01.2024	27.02.2024	28	27,01	24,78	669,3078	2 610	3,90	86,8	161	2170	3,90	2190
2					28,03	24,66	691,2198	2060	2,98	87,8	162,6	2174		
3					27,78	25,3	702,834	2 420	3,44	93,8	171,6	2206		
4			26.03.2024	56	25,62	23,77	608,9874	2 520	4,14	89,2	162,2	2222	4,06	2209
5					24,18	24,46	591,4428	2350	3,97	81	147,8	2213		
6					25,36	25,22	639,5792	3 030	4,74	92,8	169,8	2205		

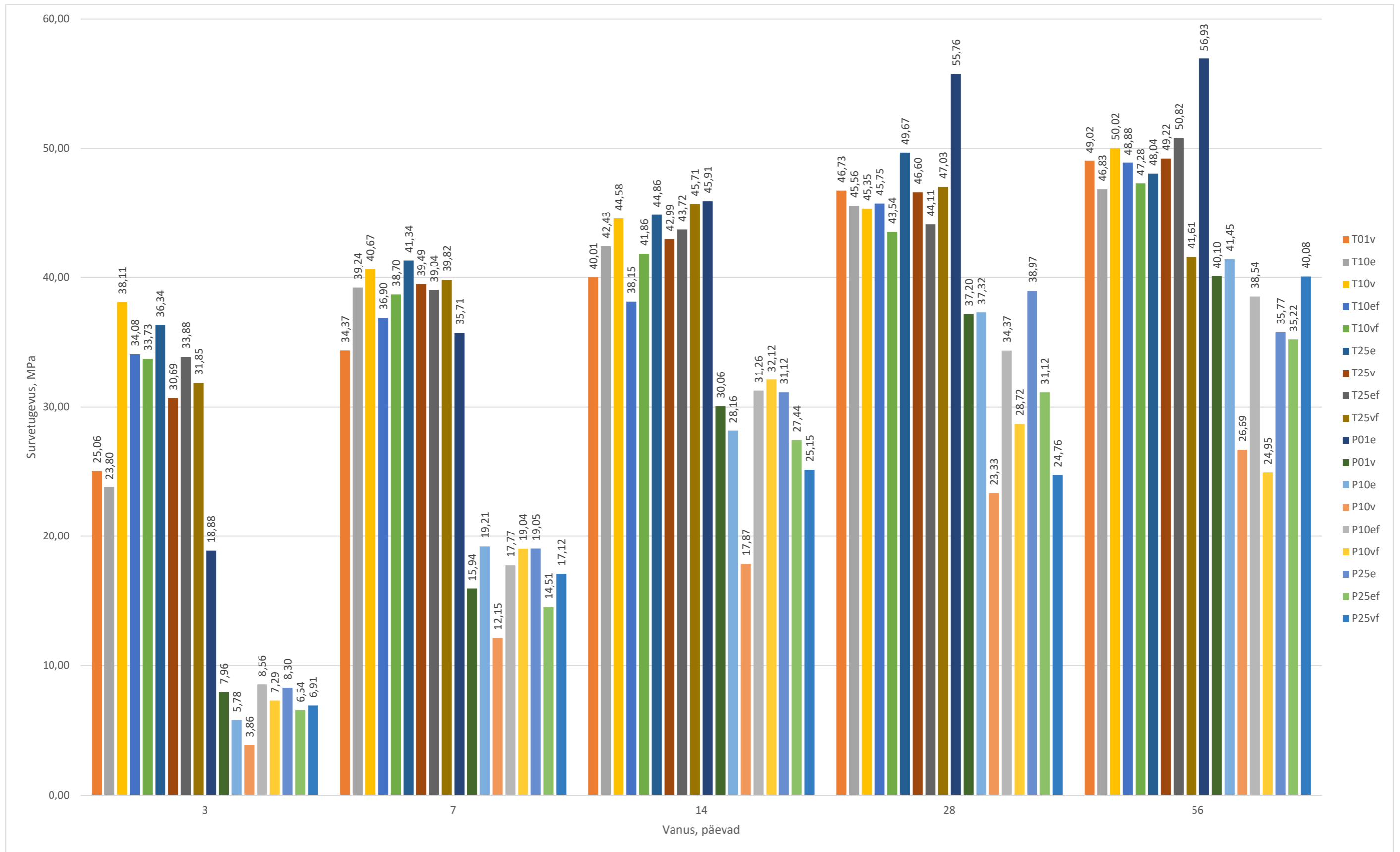
Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Laius, mm	Paksus, mm	Pindala, mm ²	Purustav jõud, N	Purustav tõmbepinge, MPa	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus kg/m ³	Keskmine tõmbetugevus MPa	
1	T25vf	30.01.2024	27.02.2024	28	27,72	25,14	696,8808	2 870	4,12	85,4	155,6	2217	4,27	
2					26,07	24,98	651,2286	1890	2,90	83,8	152,4	2222		
3					21,55	24,33	524,3115	2 320	4,42	78,6	142,8	2224		
4			26.03.2024	56	20,3	25	507,5	2 480	4,89	79	144	2215		4,89
5					24,09	24,97	601,5273	2380	3,96	81,4	148,2	2219		
6					20,69	25,45	526,5605	1 330	2,53	83,2	151,2	2224		
1	P10ef	02.01.2024	01.03.2024	28	25,17	24,79	623,9643	967	1,55	82,4	150,2	2215	2,13	
2					24,73	24,61	608,6053	1280	2,10	80	145,8	2216		
3					23,58	24,78	584,3124	1 260	2,16	80,2	147,2	2197		
4			29.03.2024	56	25,33	24,84	629,1972	1 130	1,80	81,8	151,6	2172	3,74	
5					23,43	24,38	571,2234	2390	4,18	79	147,4	2155		
6					23,41	24,11	564,4151	1 860	3,30	77,8	145,2	2154		
1	P10vf	02.01.2024	01.03.2024	28	23,38	24,51	573,0438	992	1,73	79,6	149,2	2144	2,63	
2					23,35	24,58	573,943	1310	2,28	80,6	150,2	2158		
3					24,26	24,75	600,435	1 790	2,98	80,8	150,2	2164		
4			29.03.2024	56	22,93	24,58	563,6194	2 100	3,73	80,8	151,8	2138	2,99	
5					23,39	24,82	580,5398	1790	3,08	80,2	150,8	2136		
6					22,8	24,98	569,544	1 650	2,90	80,8	151,6	2141		
1	P25ef	02.01.2024	01.03.2024	28	22,18	24,46	542,5228	1 330	2,45	76,8	140,8	2200	2,33	
2					26,95	25,95	699,3525	1550	2,22	78,2	148,8	2108		
3					23,6	24,43	576,548	1 040	1,80	76	142	2152		
4			29.03.2024	56	23,11	26,29	607,5619	1 800	2,96	78	146,4	2140	3,64	
5					20,83	24,89	518,4587	2060	3,97	75,2	139,8	2164		
6					22,26	26,57	591,4482	1 950	3,30	76,2	142,8	2144		
1	P25vf	02.01.2024	01.03.2024	28	20,87	25,9	540,533	1 290	2,39	79	143,4	2227	2,90	
2					24,2	25,54	618,068	1840	2,98	72	136	2125		
3					19,53	25,39	495,8667	1 400	2,82	72,8	133,8	2193		
4			29.03.2024	56	24,38	26,18	638,2684	1 780	2,79	80,4	151,8	2126	3,29	
5					26,41	26,36	696,1676	2640	3,79	82,2	154,8	2132		
6					27,71	26,83	743,4593	1 070	1,44	85,4	161,4	2124		

GRAAFILINE OSA

1.1 Betoonide survetugevuste koondtabel

Tabel nr.1: keskmised survetugevused																		
Vanus	Retsepti nimetus ja tugevus, MPa																	
	T01v	T10e	T10v	T10ef	T10vf	T25e	T25v	T25ef	T25vf	P01e	P01v	P10e	P10v	P10ef	P10vf	P25e	P25ef	P25vf
3	25,06	23,80	38,11	34,08	33,73	36,34	30,69	33,88	31,85	18,88	7,96	5,78	3,86	8,56	7,29	8,30	6,54	6,91
7	34,37	39,24	40,67	36,90	38,70	41,34	39,49	39,04	39,82	35,71	15,94	19,21	12,15	17,77	19,04	19,05	14,51	17,12
14	40,01	42,43	44,58	38,15	41,86	44,86	42,99	43,72	45,71	45,91	30,06	28,16	17,87	31,26	32,12	31,12	27,44	25,15
28	46,73	45,56	45,35	45,75	43,54	49,67	46,60	44,11	47,03	55,76	37,20	37,32	23,33	34,37	28,72	38,97	31,12	24,76
56	49,02	46,83	50,02	48,88	47,28	48,04	49,22	50,82	41,61	56,93	40,10	41,45	26,69	38,54	24,95	35,77	35,22	40,08

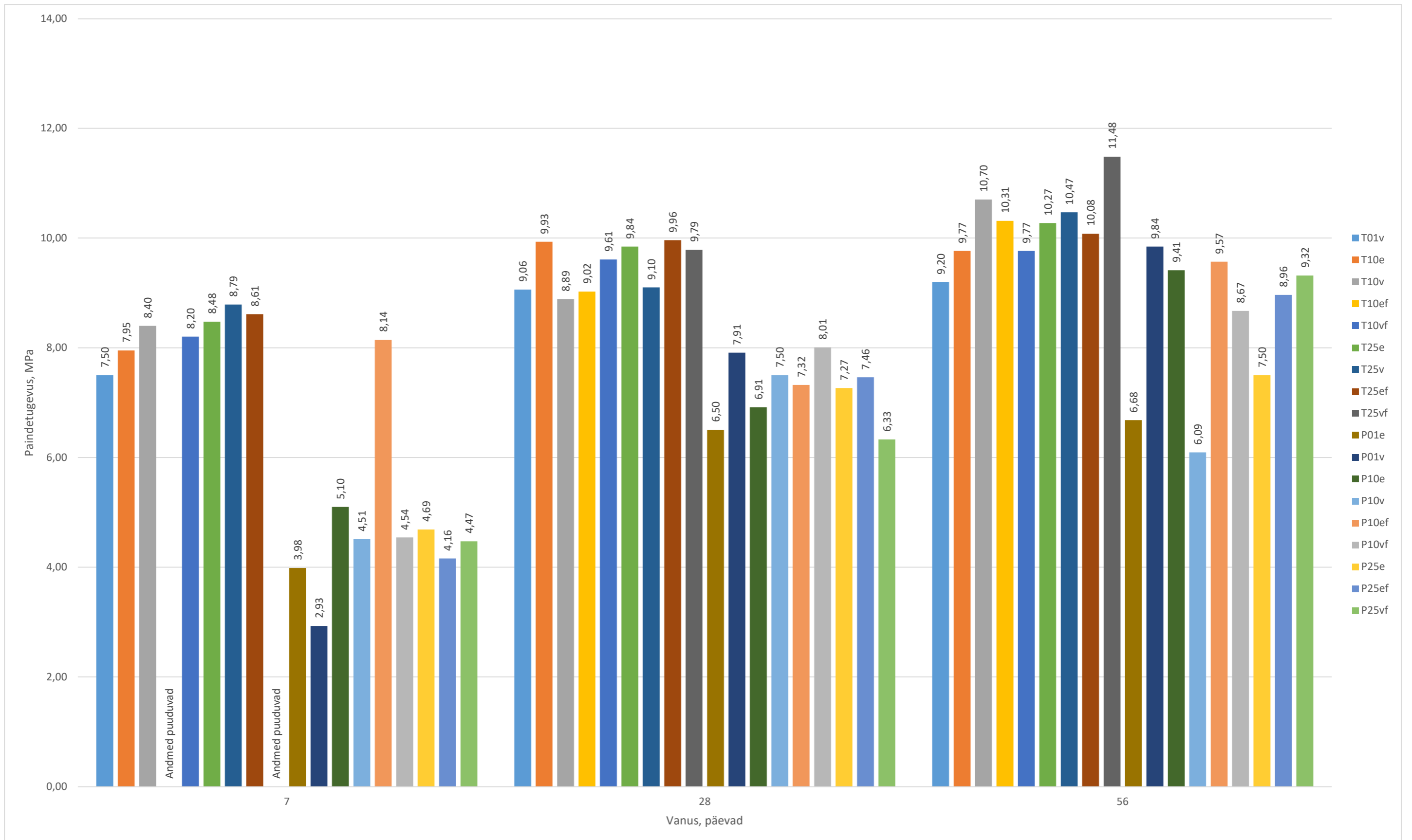
1.2 Betoonide survetugevuste koondgraafik



2.1 Betoonide paindetugevuste koondtabel

Tabel nr.2. Keskmised paindetugevused																		
Retsepti nimetus ja tugevus, MPa																		
Vanus	T01v	T10e	T10v	T10ef	T10vf	T25e	T25v	T25ef	T25vf	P01e	P01v	P10e	P10v	P10ef	P10vf	P25e	P25ef	P25vf
7	7,50	7,95	8,40	Puudub	8,20	8,48	8,79	8,61	Puudub	3,98	2,93	5,10	4,51	8,14	4,54	4,69	4,16	4,47
28	9,06	9,93	8,89	9,02	9,61	9,84	9,10	9,96	9,79	6,50	7,91	6,91	7,50	7,32	8,01	7,27	7,46	6,33
56	9,20	9,77	10,70	10,31	9,77	10,27	10,47	10,08	11,48	6,68	9,84	9,41	6,09	9,57	8,67	7,50	8,96	9,32

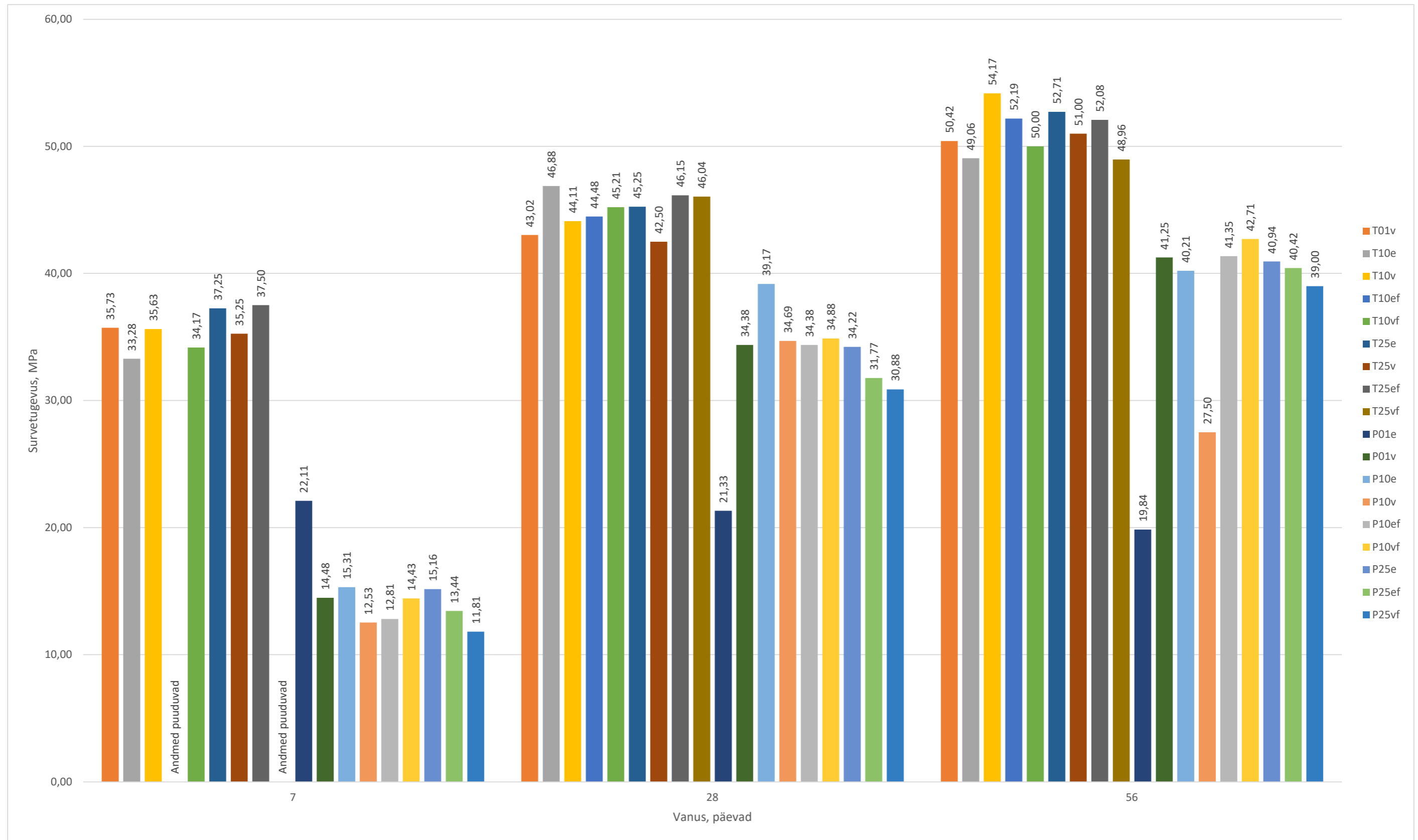
2.2 Betoonide paindetugevuste koondgraafik



2.3 Betoonide painekatsekehade survetugevuste koondtabel

Tabel nr.3: painekatsekehade survetugevused																		
Retsepti nimetus ja tugevus, MPa																		
Vanus	T01v	T10e	T10v	T10ef	T10vf	T25e	T25v	T25ef	T25vf	P01e	P01v	P10e	P10v	P10ef	P10vf	P25e	P25ef	P25vf
7	35,73	33,28	35,63	Puudub	34,17	37,25	35,25	37,50	Puudub	22,11	14,48	15,31	12,53	12,81	14,43	15,16	13,44	11,81
28	43,02	46,88	44,11	44,48	45,21	45,25	42,50	46,15	46,04	21,33	34,38	39,17	34,69	34,38	34,88	34,22	31,77	30,88
56	50,42	49,06	54,17	52,19	50,00	52,71	51,00	52,08	48,96	19,84	41,25	40,21	27,50	41,35	42,71	40,94	40,42	39,00

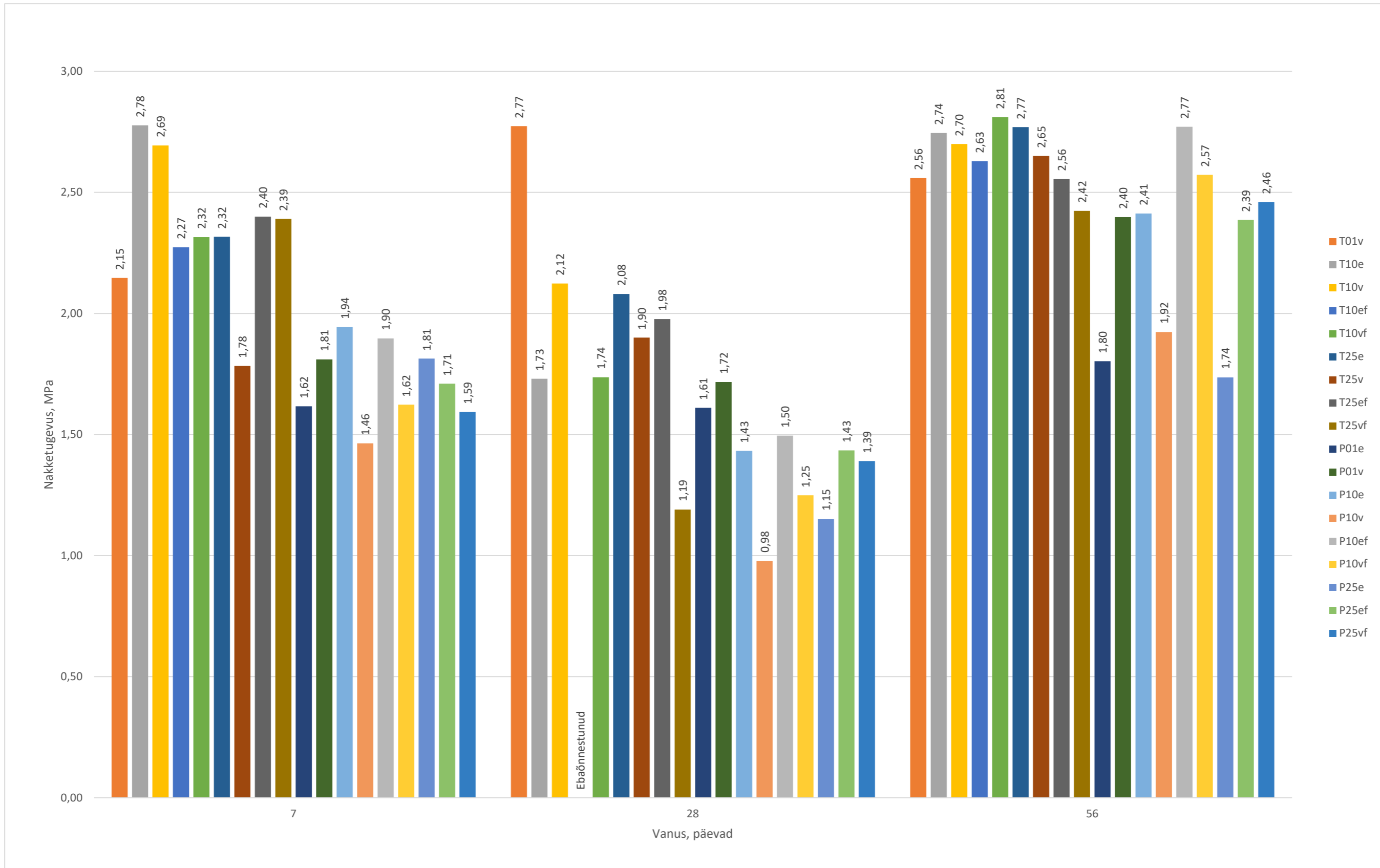
2.4 Betoonide paindekatskehade survetugevuste koondgraafik



3.1 Betoonide nakketugevuste koondtabel

Tabel nr.4: nakketugevused																		
Retsepti nimetus ja tugevus, MPa																		
Vanus	T01v	T10e	T10v	T10ef	T10vf	T25e	T25v	T25ef	T25vf	P01e	P01v	P10e	P10v	P10ef	P10vf	P25e	P25ef	P25vf
7	2,15	2,78	2,69	2,27	2,32	2,32	1,78	2,40	2,39	1,62	1,81	1,94	1,46	1,90	1,62	1,81	1,71	1,59
28	2,77	1,73	2,12	Ebaõnnestus	1,74	2,08	1,90	1,98	1,19	1,61	1,72	1,43	0,98	1,50	1,25	1,15	1,43	1,39
56	2,56	2,74	2,70	2,63	2,81	2,77	2,65	2,56	2,42	1,80	2,40	2,41	1,92	2,77	2,57	1,74	2,39	2,46

3.2 Betoonide nakketugevuste koondgraafik



4.1 Betoonide tõmbetugevuste koondtabel

Tabel nr.5: keskmised tõmbetugevused																		
Retsepti nimetus ja tugevus, MPa																		
Vanus	T01v	T10e	T10v	T10ef	T10vf	T25e	T25v	T25ef	T25vf	P01e	P01v	P10e	P10v	P10ef	P10vf	P25e	P25ef	P25vf
28	3,59	3,86	4,21	2,25	3,25	4,37	4,75	3,90	4,27	3,00	2,43	2,39	1,81	2,13	2,63	2,65	2,33	2,90
56	3,37	3,59	3,35	4,52	3,36	3,46	4,06	4,06	4,89	3,34	4,11	3,13	2,09	3,74	2,99	3,99	3,64	3,29

4.2 Betoonide tõmbetugevuste koondgraafik

