



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

3D prinditavas betoonis tsemendi asendamine põletatud põlevkiviga

REPLACING CEMENT WITH BURNT OIL SHALE IN 3D PRINTABLE CONCRETE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sander Sults

Üliõpilaskood: 182324EAEI

Juhendaja: Mattias Põldaru

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.

20. september 2024

Autor: Sander Sults
.....
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"....." 2024

Juhendaja:
.....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2024.

Kaitsmiskomisjoni esimees:
.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, **Sander Sults**,

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

3D prinditavas betoonis tsemendi asendamine põletatud põlevkiviga,

mille juhendaja on Mattias Põldaru

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

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

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

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

15.11.2024



Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **SANDER SULTS**

Üliõpilaskood **182324EAEI**

Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peeriala: Ehitiste projekteerimine

Lõputöö teema:

3D PRINDITAVAS BETOONIS TSEMENDI ASENDAMINE PÕLETATUD PÕLEVKIVIGA

Replacing Cement with Burnt Oil Shale in 3D Printable Concrete

Juhendaja: **Mattias Põldaru**

mattias.poldaru@taltech.ee

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida põletatud põlevkivi mõju peeneteralise betooni tugevusomadustele

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Katseplaani koostamine	31.01.2024
2. Teadusartiklite ja teiste materjalide läbitöötamine ja esitamine	29.03.2024
3. Katsekehade valmistamine ja katsetamine	29.04.2024
4. Katseandmete töötlus ja analüüs	29.04.2024
5. Lõputöö 95% ülevaatus	21.11.2024
6. Lõputöö esitamine	25.11.2024
7.	

Lõputööde ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

21.11.2024

Peale ülevaatus saab teha väiksemaid korrektuure ja üles laadida töö Moodle keskkonda plagiaadikontrolliks ÜHE pdf failina.

Palun vormistada lõputöö käesolevale mallile. Nõuetele mittevastavaid lõputöid kaitsmisele ei lubata.

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

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

Lõputöö esitamise tähtaeg:

25. november 2024

Plagiaadikontrolli läbinud lõputöö digiallkirjastatakse autori, juhendaja(te), konsultandi(tide) ja kaitsmiskomisjoni esimehe poolt. Paberil pole vaja allkirju koguda.

Lõputöö ülesanne välja antud: 16.02.2024

Juhendaja: **Mattias Põldaru**

Ülesande vastu võtnud: **Sander Sults**

Avalikustamise piirangu tingimused: puuduvad

Sisukord

AUTORIDEKLARATSIOON	2
LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS	3
SISSEJUHATUS	9
1 TEOREETILINE OSA	10
1.1 3D printimise võimalustest, segust ja protsessi mõjust.....	10
1.1.1 Betooni 3D printimisest ja võimalustest	10
1.1.2 3D printimisel kasutatava segu omadused	11
1.1.3 3D printimise protsessi mõju betoonile	13
1.2 Põletatud põlevkivi sideaine	15
1.2.1 Keevkihtkatla põletatud põlevkivi	16
1.2.2 Põletatud põlevkivi kasutamine betoonisegus.....	16
1.2.3 Kõrge lendtuha sisaldusega betoon ehk HVFA	17
1.2.4 Kõrge lendtuha sisaldusega kõrgtugev betoon	18
1.2.5 Peen reaktiivne lendtuhk ehk RUFA	21
1.3 3D printimine erinevate sideainetega	23
1.3.1 Tuha kasutamine 3D prinditavas segus	23
1.3.1.1 NaOH kasutamine lendtuha segudes	26
1.3.2 Sekundaarsete sideainete kombineerimine tsemendiga	28
1.3.3 Erinevate sideainete arengutest 3D betooni printimises.....	29
2 KATSELINE OSA.....	32
2.1 Katseplaan.....	32
2.2 Katsemetoodikad	32
2.2.1 Kasutatud materjalid	32
2.2.2 Katsekehade ja segude tähistamine.....	33
2.2.3 Peentäitematerjali sõelkõvera optimiseerimine.....	34
2.2.4 Mördi valmistamine betooniseguriga	34
2.2.5 Mördi valmistamine planetaarse segistiga "Hobart".....	35

2.2.6	Mördi veevajaduse määramine.....	36
2.2.6.1	Tsementsideainega mörtide retseptid ja veevajadused	37
2.2.6.2	Tuhksideainega mörtide retseptid ja veevajadused.....	39
2.2.7	Katsekehade valmistamine	40
2.2.8	Katsekehade tiheduse meetoodika	42
2.2.9	Kuubi survetugevuse meetoodika.....	43
2.2.10	Prisma painde- ja survetugevuse meetoodika.....	45
2.2.11	Betooni väljatõmbekatse meetoodika	47
2.2.12	kaheksa tõmbekatse meetoodika.....	49
3	KATSETULEMUSED	51
3.1	Tsementsideainega 2:1 liiva suhtega betoon	51
3.1.1	Survetugevus	51
3.1.2	Paindetugevus	52
3.1.3	Nakketugevus.....	53
3.1.4	Tõmbetugevus	54
3.2	Tsementsideainega 11:9 liiva suhtega betoon.....	55
3.2.1	Survetugevus	55
3.2.2	Paindetugevus	57
3.2.3	Nakketugevus.....	58
3.2.4	Tõmbetugevus	58
3.3	Tuhksideainega 2:1 liiva suhtega betoon	59
3.3.1	Survetugevus	59
3.3.2	Paindetugevus	61
3.3.3	Nakketugevus.....	62
3.3.4	Tõmbetugevus	63
3.4	Tuhksideainega 11:9 liiva suhtega betoon.....	64
3.4.1	Survetugevus	64
3.4.2	Paindetugevus	65
3.4.3	Nakketugevus.....	67

3.4.4	Tõmbetugevus	67
3.5	Tuhk- ja tsementsideaine 11:9 liiva suhtega betoonide survetugevuse kasvutempo võrdlus	68
3.5.1	Fiiбрита betoonide võrdlus	68
3.5.2	Fiibriga betoonide võrdlus	70
KOKKUVÕTE		72
SUMMARY		74
KASUTATUD KIRJANDUS		76
LISAD		80
LISA 1	SURVETUGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL	80
LISA 2	PAINDETUGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL	86
LISA 3	NAKKEGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL	89
LISA 4	TÕMBETUGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL	92
GRAAFILINE OSA		95
GRAAFIK 1	SURVETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK.....	95
GRAAFIK 2	PAINDETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK	96
GRAAFIK 3	NAKKETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK	97
GRAAFIK 4	TÕMBETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK	98

SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärk on uurida põletatud põlevkivi (lühendiga PP) kasutamist tsementsideaine asemel. Peamised uuritavad omadused on survetugevus, paindetugevus, nakketugevus ja tõmbetugevus. Samuti on oluline osa uurimistööst 2:1 ja 11:9 liiva fraktsioonide jaotuste mõju betoonidele. Betoonides kasutati ka polüpropüleenfiibrit ja superplastifikaatori. [1]

Lõputöös selgitatakse erinevatele retseptidele 3D printimiseks sobivad komponentide osakaalud, et saada vastav segu töödeldavus mis sobiks 3D printimiseks, ning uuritakse ka survetugevuse kasvutempot kahe erineva sideaine puhul.

Lõputöös kasutati PP, mis on pärit Auvere Elektriijaama 8. plokist ja mis on saadud keevkiht põletuse tehnoloogial (CFB). Antud sideaine on täiendavalt jahvatatud Kunda Nordicus, jahvatuspeensususega üle 5000 m²/kg. Erinevates maailma geograafilistes asukohtades on ka tuhkel erinevad omadused ja samuti mõjutab ka vastav elektriijaama põletustehnoloogia tuha omadusi ja on olemas erinevaid tuhkasid nagu näiteks lendtuhk, mida on paljudes teadustöodes uuritud. Seniste teadusuuringute põhjal ei ole Eesti päritolu CFB tuhka, mille jahvatuspeensus ületab 5000 m²/kg, betoonis ainsa sideainena veel põhjalikult uuritud.

1 TEOREETILINE OSA

1.1 3D printimise võimalustest, segust ja protsessi mõjust

1.1.1 Betooni 3D printimisest ja võimalustest

Ehitussektori järgmiseks tehnoloogilise arengu sammuks loodetakse läbimurret 3D betooni printimise tehnoloogia kasutusele võtmisega. Viimase paarikümne aastaga on 3D printimine tunduvalt populariseerunud ja tulevikus on võimalik betooni printimist ära kasutada ajakulu ja kulude optimeerimiseks, tööohutuse suurendamiseks ja keskkonna saastamise vähendamiseks. Betooni printimisega on võimalik vähendada ehitusjäätmete hulka ja tööjõukulu. [2]

Tänu 3D betooni printimise populariseerimisele, laienevad ka selle tehnoloogia kasutusvaldkonnad. Tänapäevase seisuga on hoonete ja rajatiste ehitamise võimekus 3D printimise tehnoloogiaga olemas. Kõrvalt leitud kihthaaval lisamise meetodi tehnoloogia abil suudeti printida mitmekorruseline kortermaja Hiinas taaskasutatud materjalidest printitud monteeritavatest komponentidest. Autorite hinnangul vastab hoone riiklikele standarditele. Teiseks silmapaistvaks projektiks osutus aastal 2016 valminud büroohoone Dubais, mis printiti ainult ühe 3D printeriga ja 250 m² pinda valmis maksumusega 140 000 dollarit. Aastal 2017 printiti ka esimene elementidest monteeritav jalakäijate sild Castilla-La Mancha pargis Madridis, mille sildeks on 12 m ja laiuseks 1,75 m. [3]





Joonis 1.1 3D printitud hooned ja rajatised [3][4]

Salet, Ahmed, Bos ja Laagland oma teadustöös arendasid kihtkihi haaval printitud järelpingestatud jalakäijate silla Hollandis. Konstruktsioon prinditi üksikutest elementidest mis kohapeal hiljem omavahel kokku monteeriti, järelpingestati ning seejärel monteeriti ühtse tervikuna monoliitsetele betoonist silla sammastele. Üksikute elementide kokkuliitmisel kasutati sünteetilist epoksiidibaasil põhinevat liimi ja põhjus seisnes, et tasandada ristlõike pindala. Vastasel juhul võib esineda ristlõikes ebavajalikke kohalikke pingeid. Järelpinge trosside ankrud ankurdati monoliitsetesse otstesse. [4]

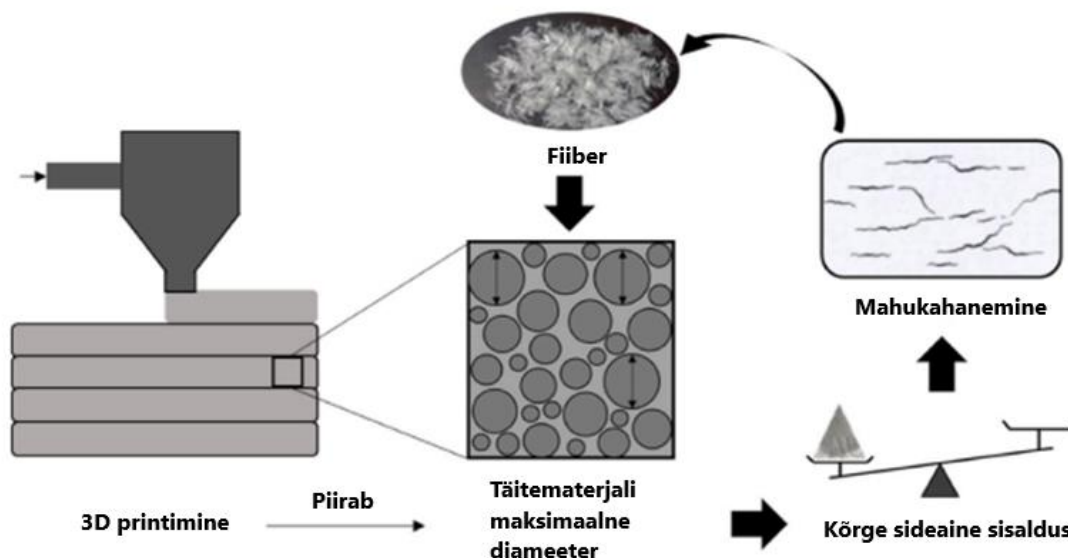
1.1.2 3D printimisel kasutatava segu omadused

Kihthaaval printitud betooni puhul kasutatakse spetsiaalselt välja töötatud segu, et oleks samaaegselt tagatud pumbatavus ja värskelt printitud segu püsivus. Kuna printitakse raketist kasutamata siis tihendamine pole võimalik ja segu peab kiiresti tarduma ning nõuab suurt varajast survetugevust. Samuti on hoonete ehitamisel püütud betoonis asendada terasarmatuuri kiudarmeeringuga ning on leitud, et süsinikkiudude kasutamine suurendab oluliselt mördi paindetugevust, kuni 174,5%, kuid kiudude kasutamise mõju survetugevust ei tõsta rohkem kui 5%. [3]

Betooni 3D printimisel mängib väga olulist rolli kiudude ja betoonilisandite kasutamine, et tagada prinditavus. Betoonilisanditest kasutatakse peamiselt plastifikaatorit ja veehoidvuslisandit. Fiibri kasutamine aitab tagada tugevama kihtide vahelise nakke ja samuti võtab vastu mahukahanemisest tingitud pingeid. Fiibri puuduseks on see, et antud lisand vähendab segu pumbatavust, ekstrudeeritavust ja pinna esteetiline välimus võib olla ebarahuldav. Üldjuhul tehakse 3D prinditud betoon madala veesisaldusega, vesitsementtegur on umbes 0,3. Madala vesitsementtegu saavutamiseks kasutatakse superplastifikaatorit, et säiliks segu töödeldavus. Wei, Bahrami, Kahla ja Ahmad oma teadusuuringus kasutatatud kõrge superplastifikaatori sisaldusega segus said kõrgema survetugevusega ja parema voolavusega segu, kuid prinditud seina püsivus halvenes märgatavalt. Samuti on uuriti mineraalsete lisandite mõju ja leiti, et nende kasutamine suurendab segu töödeldavust, näiteks peenrääni, millega suurenes betooni surve- ja paindetugevus, lisaks suurenes segu töödeldavus. Põletatud põlevkivi kasutamisega paranes segu pumbatavus ja survetugevus, juhul kui tuha osakaal tsemendist moodustas 0-25% sellest suurema osakaalu juures omadused halvenesid. Kuigi optimaalse täitematerjali fraktsiooni osas pole veel täielikku konsensust, siis peamiselt kasutatakse mõrdisegus peenliiva, et tagada pumbatavus ning kujuhoidvus. [3], [5]

Tardumise ja kivinemise kiirendajate kasutamine on omadusi parendav, kuna kiht kihi haaval printides suureneb alumiste kihtide koormus ja sein võib laguneda omakaalu tõttu enne segu tardumise algust. Zhang'i eestvedamisel tehtud teadustöös on tõestatud, et tööpoolest sedasi printimine parendab kihtide püsivust, kuid kõrvalnähuks võib osutada kaltsiumkloriidi sisaldusega kiirendi kasutamise puhul armatuuri korrosioon ja lisaks veel võib kiirendajate kasutamine mõjutada kihtidevahelist naket ja lõpuks kivistunud betoonitugevusomadusi. Kindlasti tuleb segu retsepti kohandada kiirendajate kasutamisel, kuna see vähendab segu töödeldavust ja suurendab plastifikaatori vajadust. Sellisel kujul optimeerimine vajab rohkem katseid, kuna pole täpselt teada, millist mõju avaldavad erinevad lisandid segu prinditavusele. [5]

Fiibri vajadus 3D prinditavas segus tuleb aga kasutatavatest komponentidest. Lihtsustatult vajab 3D printimine peenliiva, mis omakorda suurendab tsemendivajadust ja suurem tsemendisisaldus suurendab mahukahanemist, mistõttu pragude tekke vältimiseks lisatakse täiendavalt fiibrit. Kõik eelnevalt nimetatud komponendid v.a fiiber on suure eripinnaga ja suurendavad veevajadust, kuid selle vähendamiseks tuleb manustada superplastifikaatorit. [5]

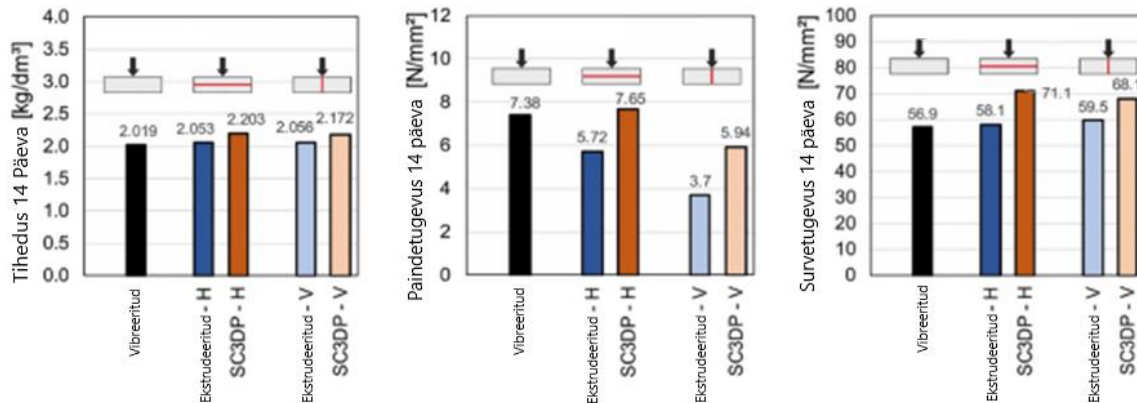


Joonis 1.2 Segukomponendid, mis seavad piirangud 3D printitavale segule [5]

1.1.3 3D printimise protsessi mõju betoonile

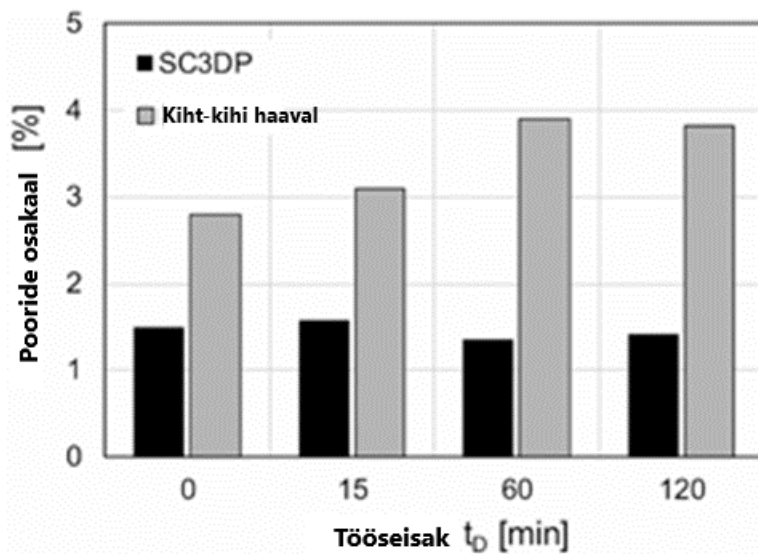
John Smithi hinnangul on praegusel hetkel vaja 3D printitud betoonil parendada mehaanilisi omadusi ja segu töödeldavust. Edukat printimise protsessi mõjutavad paljud tegurid, näiteks printeri düüsi kuju, suurus ja printimise nurk, betooni kihtide laius ja kõrgus mõjutavad tsemendist sideainega printitud kehadel mehaanilisi omadusi. Uuringutega on leitud, et ristkülikulise düüsiga saadakse tasapinnalisemavälimusega printitud seina külge, kui ümmargust või ruudukujulist düüsi kasutades. Samuti on tehtud järeldused katsete põhjal, et printitud kihi kõrgus ei tohiks olla suurem düüsi laiusest, vastasel juhul ei pruugi kihtide vaheline nakketugevus olla piisav. [6]

Printitud betooni omadused sõltuvad suuresti ka printimise tehnoloogiast. Braunschweigi Tehnikaülikoolis uuriti pritsbetooni printimise tehnoloogiat ja on leitud, et pritsbetooniga on saadud paremaid tulemusi. Pritsprintimisega saavutati suurema tihedusega katsekehad, kuna pritsides surutakse rõhuga betoon välja ja suurema jõuga allolevate kihtide vahele, kiht-kihi haaval printides sellist nähtust ei esine kuna düüsiga printides laotakse kihi üksteise peale. Samuti saadi suurem painde- ja survetugevus pritsprintitud katsekehadel kahes erinevas suunas, mida autor illustreerib alltoodud joonistel. [7]



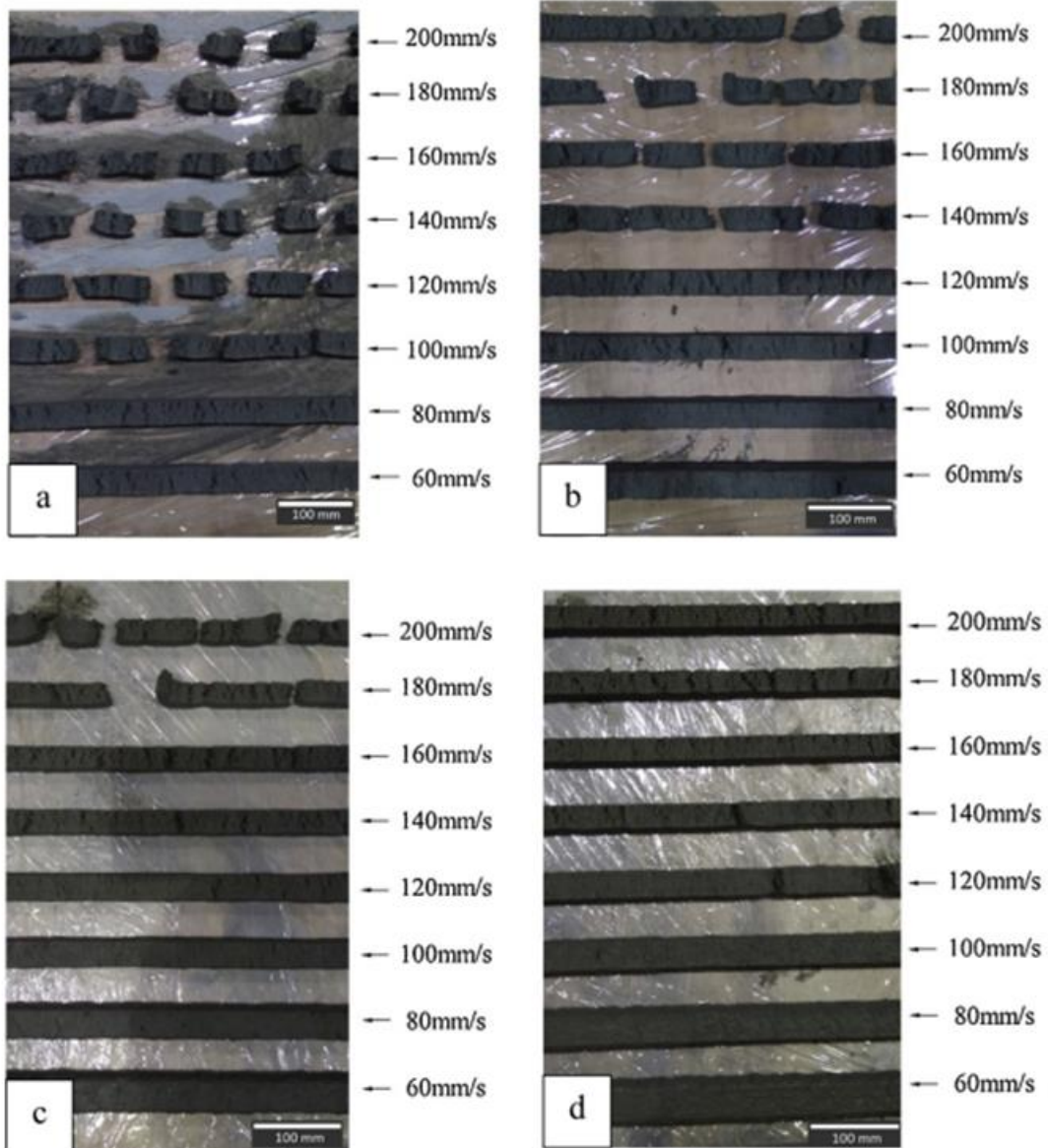
Joonis 1.3 Vibreeritud vormikehad, kiht-kihi haaval (ekstrudeeritud) prinditud betoon ja pritsitud printbetoon (SC3DP – shotcrete 3D printed) tiheduste, painde ja survetugevuste erinevused. [7]

Samas uuringus kasutati kompuutertomograafiat pooride jaotuse ja osakaalu uurimiseks. Pritsbetoonil moodustasid poorid 1,5% mahust, kuid ekstruderbetoonil 3,4%. Lisaks veel avastati, et pikemate tööseisakute korral ekstruderbetoonil pooride hulk suureneb. [7]



Joonis 1.4 Pooride hulk sõltuvalt tööseisakute perioodist. [7]

Nanyangi Tehnikaülikoolis Tay, Li ja Tan uurisid lähemalt ka printeri düüsi liikumiskiiruse ja voolukiiruse mõju prinditava elemendile ja leiti, et nendel parameetritel on väga tugev mõju. Tulemused näitasid, et kui pumpamise kiirus on madal ja düüs liigub kiirelt, tuleb prinditud joon suurte tühimikega kuna segu ei jõua piisavalt kiirelt düüsist väljuda. Samas suurema pumbakiiruse ja aeglasema printeripea liikumisega saavutati hea nake kihtide vahel ja kõrgemate tugevuslike omadustega sein, kuid selliselt ei suudetud tagada prinditud seina rahuldavat esteetilist välimust. Kiirel printimisel esinesid suuremad geomeetriselised hälbed kihtide laiustes ja kihtide omavahelises paiknemises. [8]



Joonis 1.5 Printimiskiiruse ja segu pealevoolu kiiruse mõju printitud geomeetriaale. a) pealevool: 37,9 ml/s b) 45,2 ml/s c) 48,0 ml/s d) 51,3 ml/s [8]

1.2 Põletatud põlevkivi sideaine

Mida aeg edasi, seda rohkem tuleb inimestel mõelda erinevatele alternatiivsetele sideainetele, et tagada paremat materjalide taaskasutamist. Eesti mõistes on kõige rohkem alternatiivset sideainet meil põletatud põlevkivi kujul. Jätkusuutliku ehitamise jaoks uuritakse alternatiive nagu ehitsuslik PP, ränidioksiid, nano-ränidioksiid ja lendtuhka. [9]

1.2.1 Keevkihtkatla põletatud põlevkivi

Eestis tekib suures koguses (1 miljon tonni) CFB tuhka, mis hetkel ei leia rakendust vaid ladustatakse jäätmena, millel on omakorda negatiivne mõju keskkonnale. CFB tuhka suurendab betooni veevajadust ja on putsolaanse kivinemistüübiga. Samuti keevkihtkatla tuhade kasutamisel saadakse väiksemad survetugevused ja suuremate tulemuste saamiseks tuleb keevkihtkatlas suuremat põletustemperatuuri kasutada või suurendada eripinda täiendava jahvatamisega. Jahvatamisega on võimalik parandada ka keevkihtkatla tuha aktiivsust, näiteks Tiina Haini läbi viidud uuringus leiti, et jahvatamisega saadi tuhmörtides 4-6 korda suurem aktiivsus. Samuti antud uuringus leiti veel, et jahvatamisega vähendati tuhade veevajadust ligikaudu 6% ja vähenes ka tuhapasta paisumine. [10]

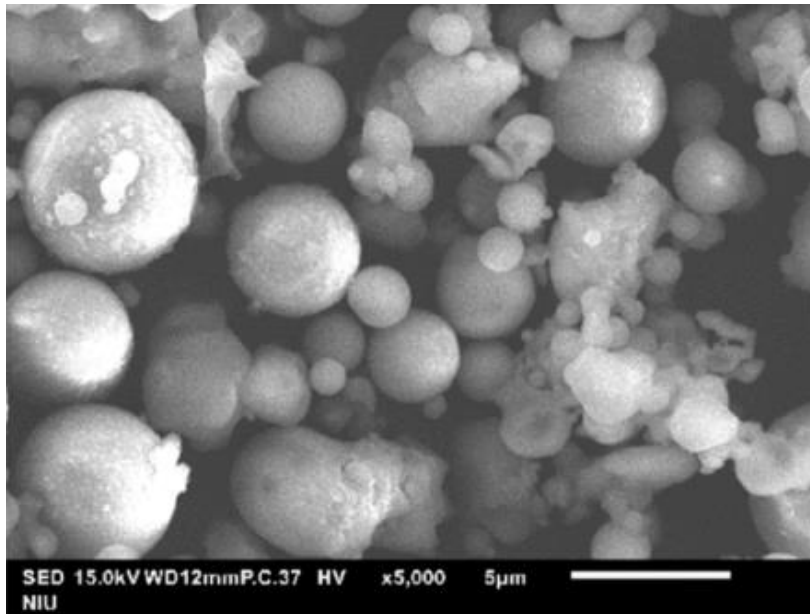
Tiina Haini uuringus leiti laborikatsete tulemuste põhjal, et üle 20% tsemendi massist ei ole soovitatav keevkihtkatla jahvatatud tuhkasid betoonile lisada, sest 30% asendusmäär juures betooni omadused halveneivad. Küll aga senini pole katsetatud tsemendi asendamist 100%-l määral CFB tuhaga ja mille eripinnaks on saadud jahvatamisega vähemalt 5000 m²/kg. [10]

Autor järeldab, et erinevatel tühkadel on omased spetsiifilised omadused, mis võivad varieeruda sõltuvalt nende tekkekohast ja tingimustest. Seetõttu oleks asjakohane uurida ka teistes geograafilistes piirkondades toodetud tuhade omadusi ning hinnata nende sobivust ja potentsiaali Eesti ehitustööstuses kasutamiseks.

1.2.2 Põletatud põlevkivi kasutamine betoonisegus

Lendtuhk on putsolaan, mida saadakse põlevkivi elektriijaamadest jäätmena. Sisaldab kõrges koguses ränidiioksiidi ja alumiinium(III)oksiidi, kuid selle tsementeerumise võime on suhteliselt madal. Ajalooliselt on kasutatud põletatud põlevkivi komposiitsegmentides lisakoostiskomponendina, et vähendada reaktiivsete kemikaalide infiltreerumist. [11], [12]

Lendtuha osakesed on ümmargused ja seetõttu betoonisegusse lendtuha doseerimine parandab segu töödeldavust ja võimaldab väiksemat vesitsementtegurit. Tuhaosakesed on üldjuhul väiksemad kui 50 µm ja on väiksemad kui tsemendiosakesed, mis võimaldab tsemendiosakeste vaheliste tühimike täitmist. [13]

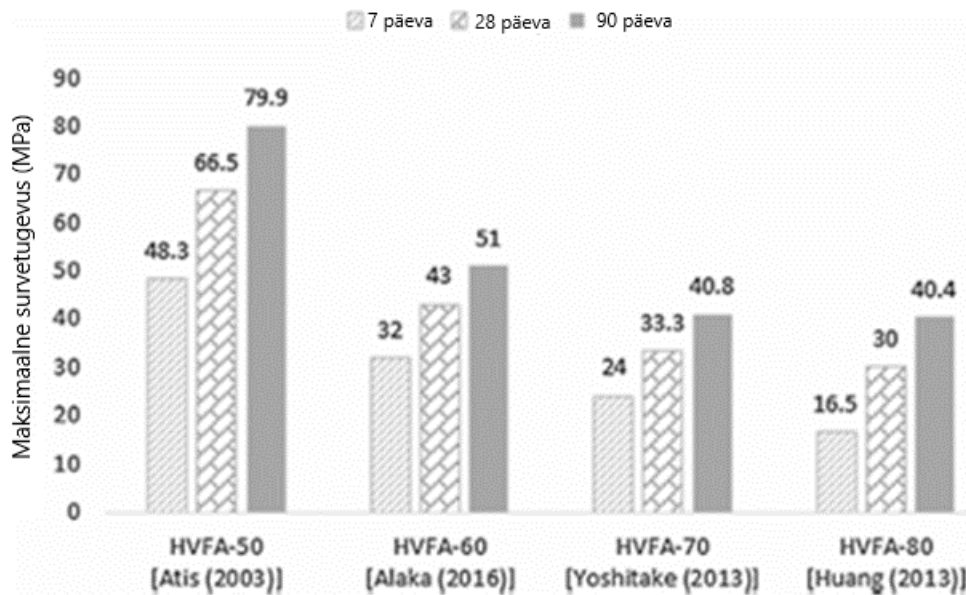


Joonis 1.6 Elektronmikroskoopiline pilt lendtuha osakekestest [14]

Samuti on järeldatud uuringute tulemustest, et lendtuha lisamine tsementi parandab segu töödeldavust, vähendab mahukahanemist ja roomet. [12]

1.2.3 Kõrge lendtuha sisaldusega betoon ehk HVFA

Betoonid, kus on üle 50% tsemendist asendatud lendtuhaga, nimetatakse HVFA (high volume fly ash). RMIT ülikooli ülevaate artiklis analüüsiti, millist mõju omab suurel hulgal tsemendi asendamine tuhksideainega. Nimelt asendati tsementsideaine osa segus lendtuhaga 50/60/70 ja 80%. Mehaaniliste omaduste poolest tuli välja väga tugev seos, et mida rohkem tuhksideainet kasutati, seda madalam survetugevus saadi kivilinenud betoonil. Eriti drastiline erinevus saadi just lühikese kivilinemisajaga katsetel, tulemused erinesid pea kaks korda 50%-se ja 80%-se tsemendi asendusmäära juures. Katsetes kasutati vesisideainetegurit 0,25-0,4. Nende väärtuste ületamisel saadi suhteliselt madalad survetugevused erinevate asendusastmete puhul. Näiteks 60% lendtuhaga asendamise puhul saadi 0,6 vesisideaine suhtega 28 päevastel katsekehadel survetugevus 9,8 MPa, võrdluseks sama segu 0,32 suhte väärtusega saadi katsekehal survetugevuseks 32,1 MPa. Lisaks leiti, et paindetõmbe- ja lõhestustõmbetugevused vähenesid kõrgema tuhksideaine sisalduse puhul (kuni 47%). Samuti täiendavalt vähendas survetugevust superplastifikaatori kasutus, seos doseeringu ja tugevuse vähenemise vahel polnud lineaarne. Suurem tuha asendusprotsent vähendas elastsusmoodulit (kuni 30%). Plastifikaatori sisalduse suurendamine vähendas elastsusmoodulit kuni 15% 2% doseeringu juures. [15], [10]

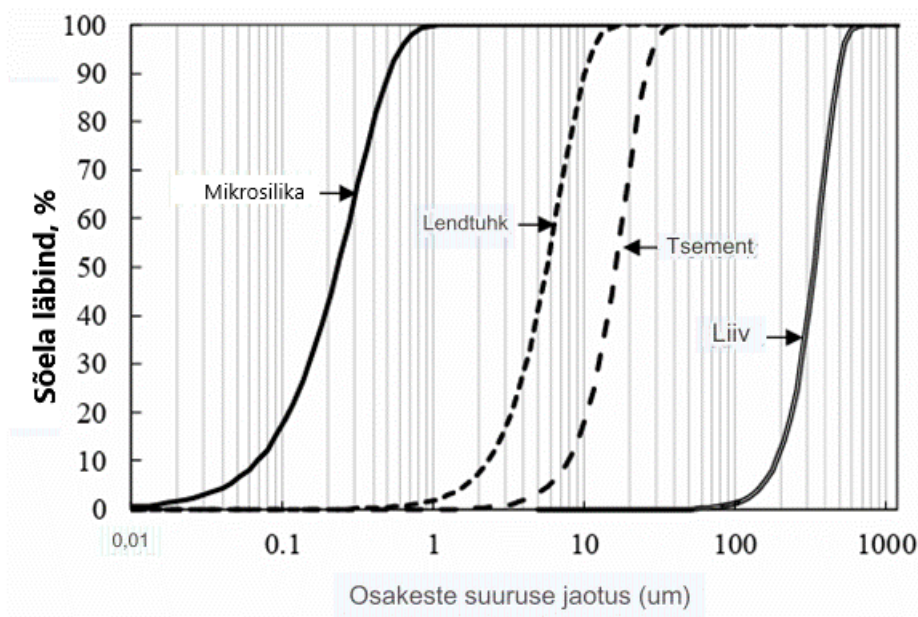


Joonis 1.7 Kõrgeimad survetugevused erinevatel lendtuha osakaaludel. (HVFA-80 ehk 80% tsemendi asendati tuhaga.) [16]

1.2.4 Kõrge lendtuha sisaldusega kõrgtugev betoon

Dong, Tuan, Thanh, Thang, Cu ja Mun on teinud uuringuid ka lendtuha osakaalu optimeerimiseks kõrgtugeva betooni valmistamisel (edaspidi UHPC). UHPC-d kasutamise eeliseks on tunduvalt paremad omadused tavabetooniga võrreldes. Näiteks UHPC elastsusmoodul ja survetugevus on kõrgemad ja lisaks on selline betoon hea vastupidavusega ilmastikuoludele. Samuti saab teha UHPC-st kergemaid või suurema sildega konstruktsioone. UHPC segus kasutatakse komponente, mis teevad selle segu kasutamise majanduslikult ebamõistlikuks ja seetõttu on vaja kasutada tuhka maksumuse ja CO₂ heitmete vähendamiseks. Dong, Thang, Nguyen ja Mun poolt tehtud uuring tõestab et tuhksideainega tsementsideaine asendamine on kasulik betooni tugevuslikele omadustele. Uuringus katsetati 20 erinevat segu varieeruvate vesitsementteguritega, erinevate lendtuha sisalduse, kahes erinevas kivistumistingimuses ja viiel erineval kivistumisperiodil. [17]

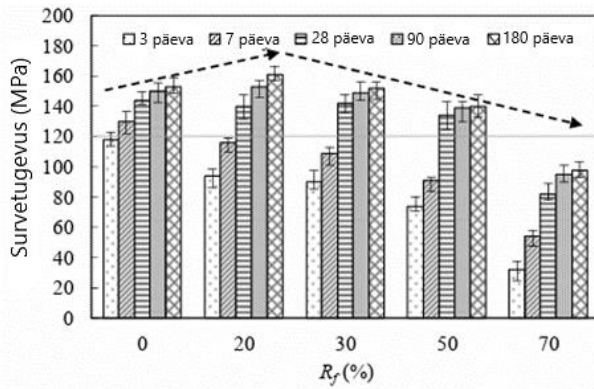
UHPC nõuab kõrget tsemendi ja mikrosilika kasutamist ja sellest tulenevalt on tegu madala vesitsementteguriga seguga, millele tuleb doseerida suures koguses superplastifikaatorit. Samuti on selle betooni hüdratatsioon tunduvalt aeglasem, millest tulenevalt võib vajalik olla segu temperatuuri tõstmine. [17]



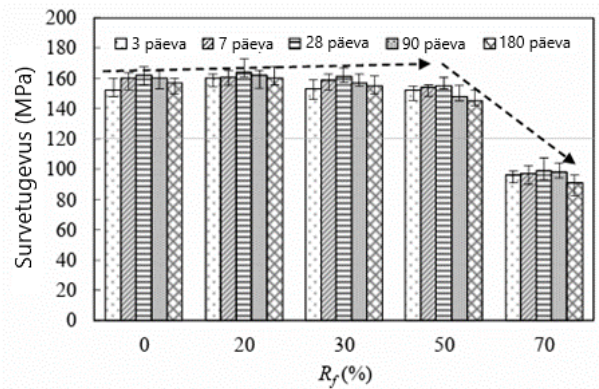
Joonis 1.8 Uuringus kasutatud komponentide sõelkõverad [17]

Autor järeldab graafikult, et lendtuhk sobib kasutamiseks ka sellepärast, et osakeste suurus jääb tsemendi ja mikrosilika osakeste vahele, mis tähendab, et saavutatakse suurem tihedus ja suuremad tugevusnäitajad.

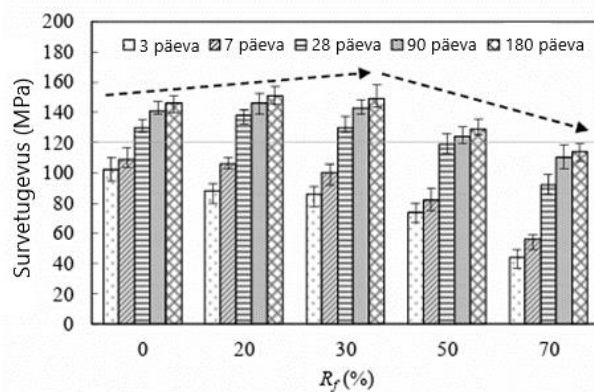
Uuringuga tõestati, et UHPC segus tsementsideaine asendamine 20-30% lendtuhaga olenevalt vesitsementtegurist võimaldas saavutada katsekehadel kõrgema survetugevuse, kui ilma lendtuhata segudel. Suuremate doseeringute puhul langes survetugevus märgatavalt. Huvitav nähtus, mis esines vesitsementteguri 0,12 juures oli see, et 70% lendtuhaga asendamise puhul oli täheldada survetugevuse suurenemist üle 50%, väiksemate asendusprotsentide puhul ei olnud see määr niivõrd suur, mida saab lähemalt uurida ka alltoodud graafikutelt. Teadustöö labori tingimustes ($27 \pm 2^\circ\text{C}$, $RH \geq 95\%$) tulid survetugevused madalamad, kui kuumas vees ($90 \pm 3^\circ\text{C}$) esimesed 48h ja edaspidi teadustöö labori tingimustes kivinedes.[17]



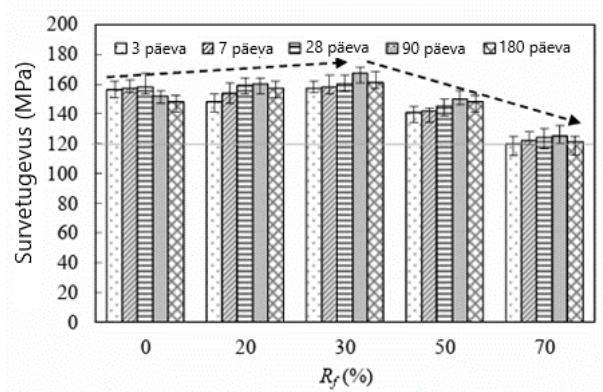
(c) W/B = 0.14



(c) W/B = 0.14



(d) W/B = 0.12



(d) W/B = 0.12

Joonis 1.9 Teadustöö labori tingimustes (vasakpoolsed graafikud) ja kuumades (parempoolsed graafikud) tingimustes kivinenud katsekehad. [17]

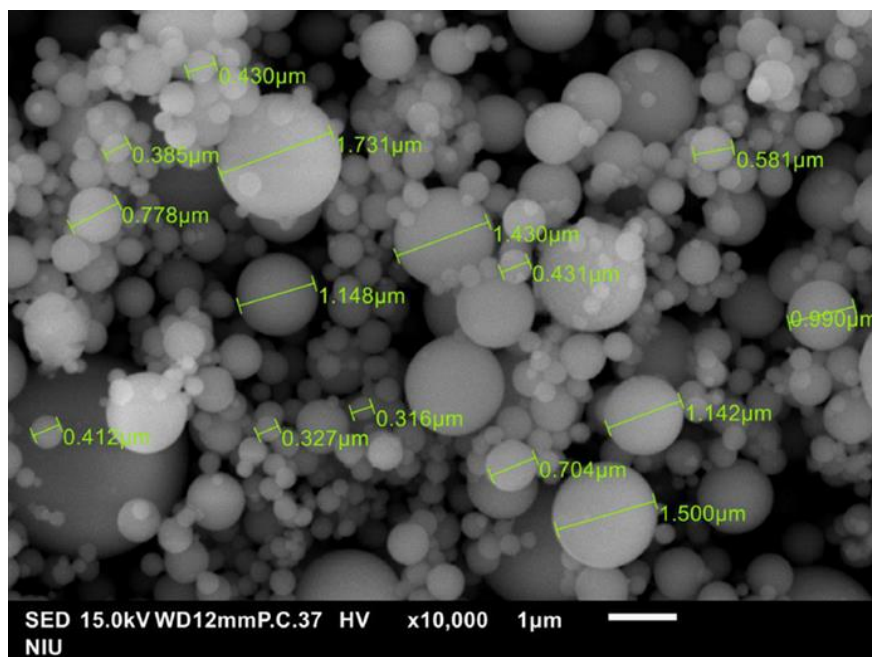
Segu	Suurim 28 päevase seeria survetugevus (Ma)	Kivistumistingimused	V/TS	Mikroniliku (% sideaine massist)	Lendtuhk (% sideaine massist)
1	146	Laboritingimustes	0,16	10	0
	162	Kuumades tingimustes	0,14		
2	149	Laboritingimustes	0,16	10	20
	164	Kuumades tingimustes	0,14		
3	142	Laboritingimustes	0,14	10	30
	161	Kuumades tingimustes	0,14		
4	134	Laboritingimustes	0,14	10	50
	155	Kuumades tingimustes	0,14		
5	92	Laboritingimustes	0,12	10	70
	124	Kuumades tingimustes	0,12		

Joonis 1.10 Survetugevuskatsete tulemused 28 päeva vanustel kuubikutel [17]

Jooniselt nähtub lisaks, et ka 70% tuhksideainega on võimalik UHPC kohaselt arvestatavaid tulemusi saavutada. Lisaks võib järeldada sellest uuringust, et majanduslikult ebamõistlikke lahendusi on võimalik teha mõistlikuks asendades kallimat sideainet tööstuse jääkidega, kuid palju uuringuid on veel vaja et teooria praktikasse tuua.

1.2.5 Peen reaktiivne lendtuhk ehk RUFA

Peen reaktiivne lendtuhk (*reactive ultra fine fly ash* edaspidi RUFA) on sarnaste keemiliste omadustega nagu tavaline lendtuhk, küll aga on väga suur erinevus osakeste suurusel, millest tulenevalt on eripind kordades suurem kui tavalisel lendtuhal. RUFA eripinnaks saadi ühes uuringus (Hiina elektrijaamast pärit) $3380 \frac{m^2}{kg}$ ja tuhaosakeste suuruste vahemik oli 0,1-0,5 μm . Kui aga tulla Eestisse, siis siin tehtud alusuuringus saadi jahvatatud tuha eripinnaks kuni $1092 \frac{m^2}{kg}$, võrdluseks originaaltuhal oli see väärtus $602 \frac{m^2}{kg}$. Jahvatuspeenuse määrab peamiselt kasutatud jahvatustehnoloogia. Tuha omadused sõltuvad ka põlevkivi koostisest ning elektrijaamas kasutatavast põletustehnoloogiast. [10], [12]

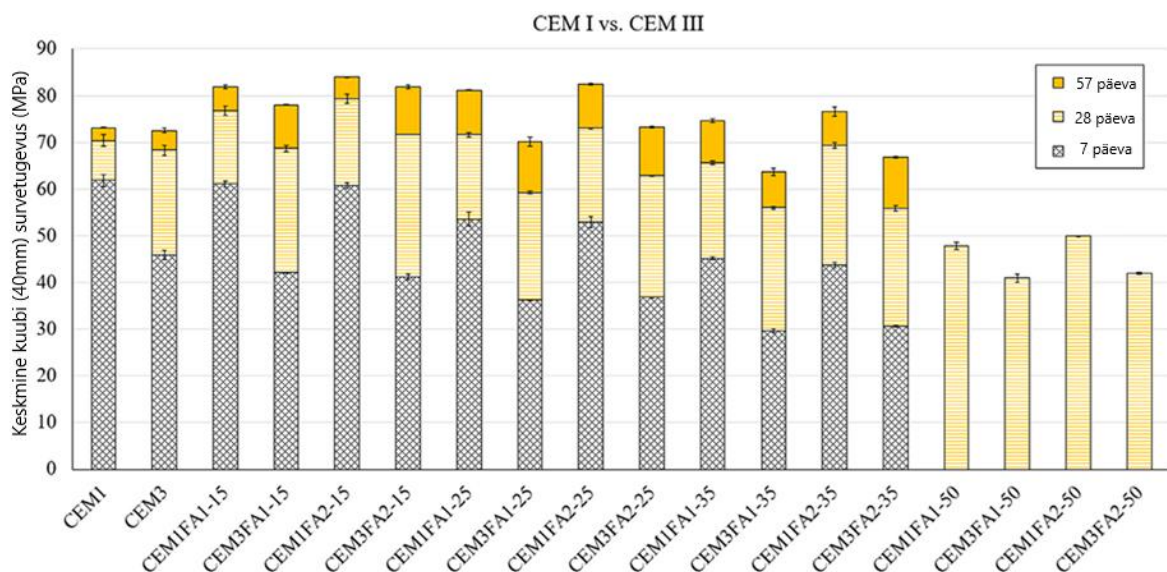


Joonis 1.11 10000 kordse suurendusega SEM RUFA osakestest. [12]

Wei-Ting Lin järeldas oma uuringutes, et RUFA kasutamine betoonilisandina parendas hüdratatsiooni mördis, saades kõrgemad survetugevused ka 7 päeva vanustel katsekehadel, tsementsideainega katsekehadega võrreldes. Seda tänu sellele, et RUFA väiksemate osakeste tõttu täitisid poorid ja tühimikud, mida tsemendiosakesed ei suutnud täita, mis suurendas survetugevust ja veepidavust. Tänu väiksematele osakestele saadi tihedamalt pakitud betoon, mis omakorda vähendas kloriidide ionide infiltratsiooni.

Mahukahanemine vähenes samuti RUFA kasutamisel ja seda mõjutab RUFA suurem eripind, tsemendiosakeste suurem kaugus üksteisest, väiksem eksotermia ja oluliselt mõjutab ka see asjaolu, et lendtuhk tardub ja kivineb aeglasemalt. Mida suuremat osakaalu RUFA-t kasutati segus. Samuti leiti, et RUFA doseerimine vähendas ka kapillaarpooride osakaalu tänu kaltsium-silikaat-hüdraatide kolloidide suurenenud osakaalule. [12]

Veel ühes teises uuringus mitme erineva Belgia ülikooli teadlaste koostöös uuriti mördis tsementsideaine asendamist RUFA-ga ja asendusemääraks valiti 15, 25, 35 ja 50%. Kasutati CEM I 52,5 R tsementi ja CEM III/A 42,5 N räbutsementi ning lendtuhka (FA1) ja peent lendtuhka (FA2). [18]



Joonis 1.12 Katsekehade survetugevused [18]

Lisaselgituseks joonisele lisab autor, et näiteks kood "CEM1FA2-25" tähendab, et segu tehti CEM I tsemendi, "FA2" ultrapeene lendtuha ja 25% tsemendi asendamise määraga. Teadustööst pärit graafikul oli CEM I 52,5 R ja CEM III/A 42,5 N tsement. FA1 tähendab tavalist lendtuhka mille suurim osake jääb alla 9,3 µm ning FA2 peent lendtuhka, mille suurim osake jääb alla 4,6 µm. [18]

Tehtud uuringus survetugevust analüüsidest leiti, et varases vanuses on ilma tuhata tsement kuni 110% tugevam, kuid kuu või kahe pärast oli näha tuhaga asendamisel kõrgemaid survetugevusi. Peene lendtuha survetugevuste tulemused 57 päeva vanuselt olid 2,2% kõrgemad kui tavalisel lendtuhal. Küll aga peene lendtuhaga saavutati parem segu reaktiivsus, töödeldavus ja parem vastupanu kloriidide migratsioonile betooni. Peene lendtuha kasutamine segus kiirendas betooni karboniseerumist, kuna lendtuha puitsolaanne reaktsioon kasutab tsemendis leiduvat kaltsiumhüdroksiidi, mis vähendab

tsemendi vastupanu karboniseerumisele. Samuti leiti, et mida peenemat ja suuremas koguses lendtuhka kasutada, seda kiirem on karboniseerumise protsess ja CEM III kasutamise puhul oli võrdlemisi kiirem, kui seda CEM I puhul (CEM III tsement sisaldab vähem CaO, kui CEM I). [18]

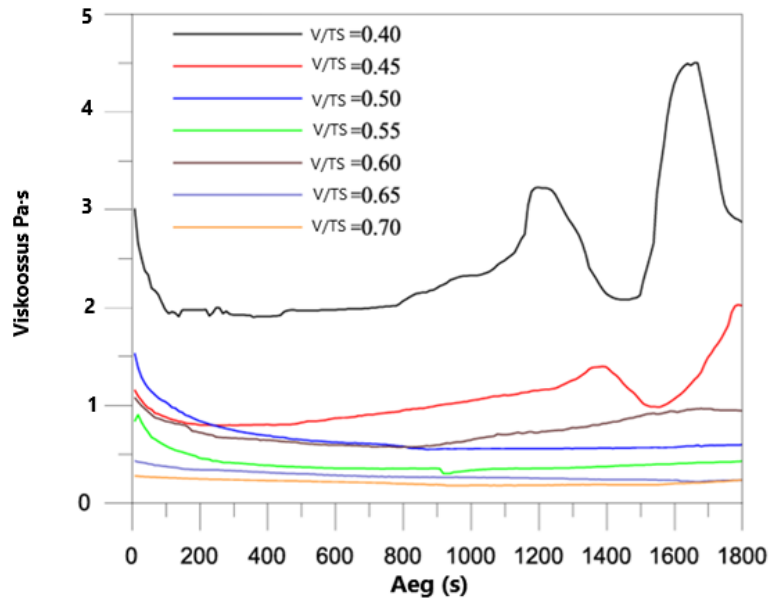
1.3 3D printimine erinevate sideainetega

1.3.1 Tuha kasutamine 3D prinditavas segus

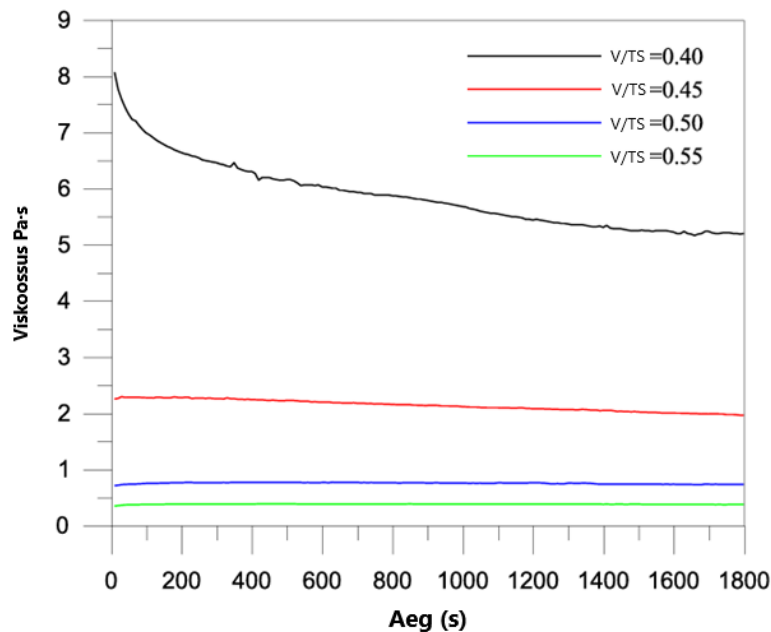
Hetkel on uuritud põhjalikult ja leidub palju artikleid 3D betooni printimise kohta tsementsideainega, kuid tuha kasutamise kohta 3D printimisel pole niivõrd palju uuringuid tehtud. Eriti tänases olukorras on kriitiline uurida jäätmete kasutamise võimalusi, et tagada jätkusuutlikum materjalide kasutus tulevikus. [14]

Fiala, Lin, Hotěk, An Cheng uurisid tsementsideaineta betooni printimise võimalikkust. Uuriti tuhksideainega ja kõrgahjuräbuga segu viskoossust, tardumist, töödeldavust ja survetugevust. Segud tehti nii, et kasutati ainult ühte sideainet ja kõiki sideaineid erinevates osakaaludes korraga. [19]

Segude viskoossuse testimisel kasutati segus ainult ühte sideainet ja leiti, et kõrgahjuräbu ebaregulaarse kujuga osakesed vähendasid segu voolavust ja lendtuha puhul oli sfääriliste osakeste tõttu segu voolavam. Vesitsementteguri 0,4 puhul tuli peen lendtuhk kõrgema viskkoosusega kui tavaline lendtuhk. Ehk siis peene lendtuha mört on küllaltki nidus ja tänu sellele paraneb 3D printimisel kihtide vaheline eelkõige varajane adhesioon. Võrdsete vesitsementtegurite (0,5) juures kõrgahjuräbu, lendtuha ja peene lendtuhaga saadi viskkoossuseks 1,884 Pa·s, 0,589 Pa·s ja 0,728 Pa·s. [19]



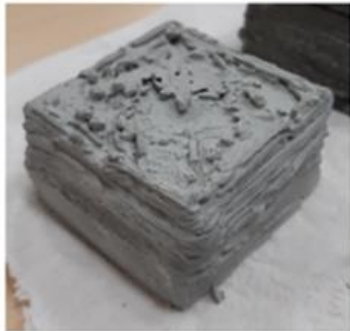
Joonis 1.13 Lendtuha viskoossuse sõltuvus ajast [19]



Joonis 1.14 Peene lendtuha viskoossuse sõltuvus ajast [19]

Tardumise aja määramisel kasutati kolmekomponentseid sideaine segusid. Kõrgahju räbu kasutamine pikendas tardumisaega, mille osakaal sideainete segust oli 10%. Lendtuha ja peene lendtuha suhe valiti vastavalt sellele, et segu oleks 3D prinditav. Katseandmed näitasid, et sellise segu tardumisaja algus oli vähemalt 4 tundi ja tardumisaja lõpp 24h ja testid viidi läbi viskosimeetriga. 3D printimise jaoks on sellised ajad igati mõistlikud, sest soovituslik tardumisaeg sellistel segudel ongi 4h, et oleks kogu protsessi vältel tagatud segu hea töödeldavus, vastasel juhul tulevad liiga ebaühtlased prinditulemid. [19]

Samuti leiti, et kui kasutada tsemendivaba segu printimiseks, on optimaalseim kasutada segus 10% räbu, 40% peent tuhka ja 50% tavalist lendtuhka. Rahuldav tulemus saadi vesi-sideaine teguri 0,25 juures selles uuringus kasutaud tehnoloogiste lahendustega. Kihtkihi haaval tüüpi 3D printerit ja "Cura" tarkvara kasutati, et saada ühtlaselt prinditud katsekeha. [19]



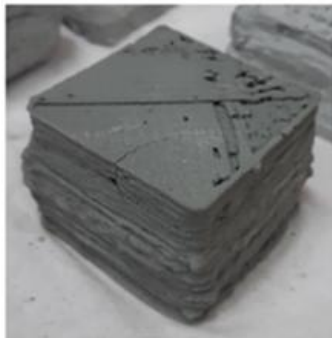
(a) W25R4 **Voolukiirus 100%**



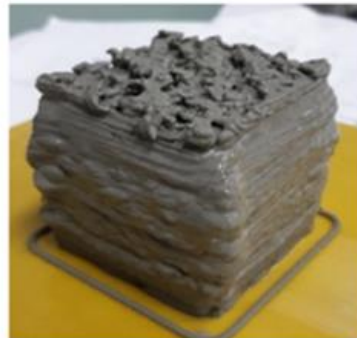
(b) W25R4 - **Voolukiirus 70%**



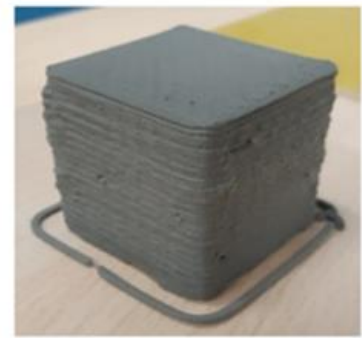
(c) W25R4 - **Voolukiirus 60%**



(d) W25R4 - **Voolukiirus 50%**



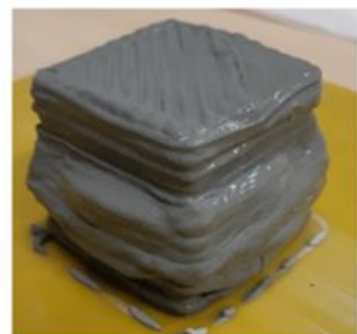
(e) W25R4 - **Voolukiirus 45%**



(f) W25R4 - **Voolukiirus 40%**



(g) W30R4 - **Voolukiirus 40%**



(h) W30R4 - **Voolukiirus 20%**

Joonis 1.15 Prinditud kehad kihtkihi haaval printiva printeriga erinevate pumba kiiruste ja vesisideaine suhtega [19]

Survetugevuse katsed tehti kõige parema prinditulemi andnud segu retseptile (W25R4, kuup servaga 50mm). Keskmiselt saadi prinditud survekuubikutele survetugevuseks 7 päeva vanustele kehadele 0,88 MPa ja 14 päeva vanustele 1,18 MPa. Teisel katseseerial lisati 2-molaarset naatriumhüdrosiidi lahust ja lasti kehadel kivineda erinevatel

tingimustel. Selliselt saadi 7 päeva vanustele prinditud kehadele survetugevuseks 11,3 MPa. [19]

Valmistusviis	Vanus	
	7 päeva	14 päeva
	Survetugevus	
3D prinditud katsekeha	0,88	1,18 MPa
Vormitud katsekeha	0,94	1,28 MPa

Joonis 1.16 Survetugevused 3D prinditud ja vormitud kehaadel [19]

Valmistusviis ja kivinemise tingimused	Vanus	
	7 päeva	14 päeva
	Survetugevus	
3D prinditud katsekeha (õhu käes kivines)	0,88	1,18 MPa
Vormitud katsekeha (ahjus kuumutamine 60 kraadi juures 24h ja hiljem õhu käes)	0,94	1,28 MPa
Vormitud katsekeha (õhu käes kivinemine)	12,27	15,09 MPa

Joonis 1.17 Survetugevused naatriumhüdroksiidi doseerimisega [19]

1.3.1.1 NaOH kasutamine lendtuha segudes

Kumar ja Reddy läbiviidud uuringus uuriti lähemalt NaOH kontsentratsiooni mõju isevalguval lendtuha geopolümeersel betoonil. Segudes kasutati NaOH kontsentrati 8–16 mol/L lahuse suhtes, intervalliga 2 M. Lisaks kasutati naatriumsilikaati suhtega 2:1 NaOH suhtes. [20]

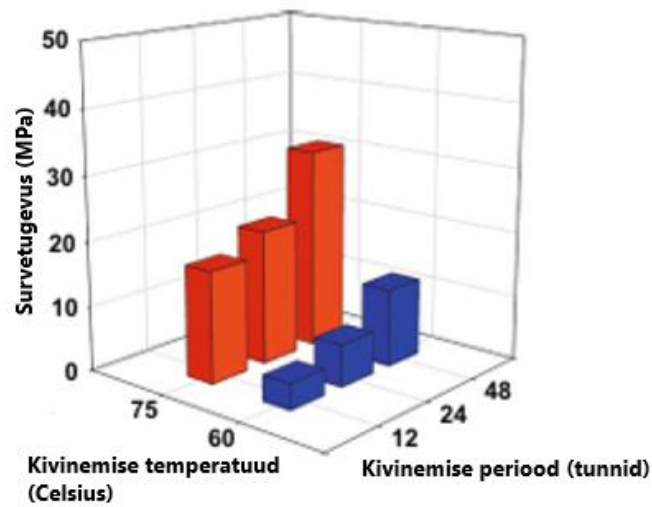
Kõrgemate NaOH kontsentratsioonidega vähenes segu valguvus ja saadi suurem survetugevus, lõhestustõmbetugevus ja paindetugevus. Segu töödeldavus vähenes tänu sellele, et naatriumhüdroksiid ja naatriumsilikaat on kõrgema viskoossusega. Naatriumhüdroksiid kiirendas tolles uuringus ka tardumis- ja kivinemisprotsessi betoonis tänu kiirematele polümeersetele reaktsioonidele. [20]

Molaarsus	Survetugevus		Lõhestustõmbe tugevus (MPa)	Paindetugevus (MPa)
	7 päeva	28 päeva		
8 M	17,15	25,74	2,56	3,22
10 M	19,34	28,56	2,79	3,52
12 M	22,34	31,94	3,12	4,05
14 M	22,84	33,63	3,29	4,12
16 M	23,33	34,9	3,42	4,22

Joonis 1.18 Tugevusnäitajad NaOH sisalduse suurenedes [20]

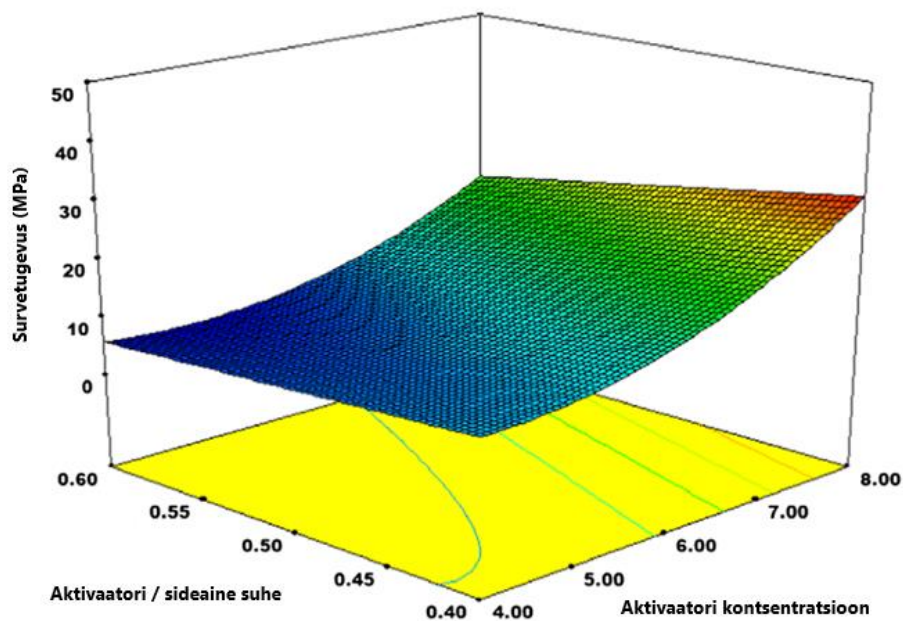
Clarksoni ülikoolis uuriti 4, 6 ja 8 M NaOH mõju betoonile, kus oli F-klassi tuhk (ASTM C618 kategoriseerimise alusel) ainsaks sideaineks ja vaadeldi erinevaid aktivaatori-

sideaine suhteid. Katsekehadel lasti kivineda 60°C ja 75°C kuumutusahjus 24h ja 48h (aktivaatori ja sideaine suhe 0,4). [21]



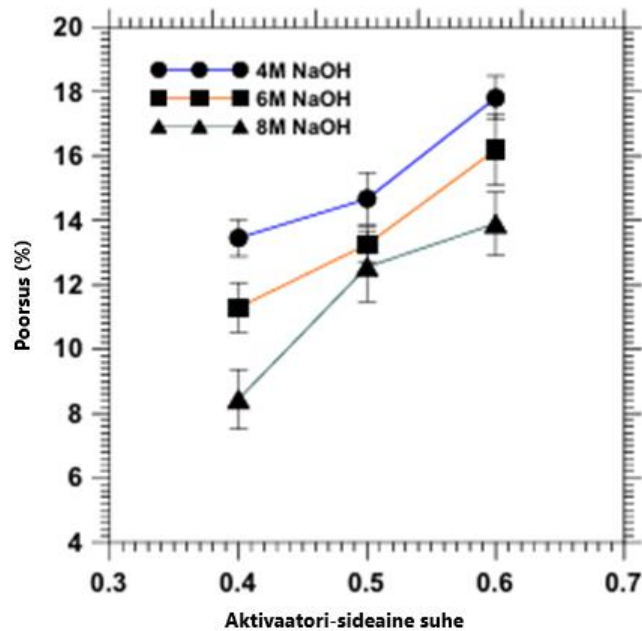
Joonis 1.19 Saadud survetugevused lendtuhal erinevatel tingimustel [21]

Samuti nagu eelnevalt mainitud, mõjutab survetugevust lendtuhal NaOH kontsentratsioon ja aktivaatori-sideaine suhe. Antud uuringus leiti, et optimaalseim aktivaatori-sideaine suhe on 0,4 8M NaOH kontsentratsiooni juures. Suurema suhte juures vähenes survetugevus suurenenud pooride hulgast, millede suurus on enam kui 10 μm , mis oli tingitud kuuma õhu käes kuivamisest. [21]



Joonis 1.20 aktivaatori-sideaine suhte ja aktivaatori kontsentratsiooni mõju survetugevusele [21]

Allolevalt jooniselt nähtub, et poorsus suurenes märgatavalt kõrgema aktivaatori-sideaine suhte juures, kuid kõrgema molaarsuse NaOH vähendas pooride osakaalu. [21]



Joonis 1.21 aktivaatori-sideaine suhte ja aktivaatori kontsentratsiooni mõju kehade poorsusele [21]

Siit ka järeldub kahe uuringu pealt, et naatriumsilikaadi (tuntud kui vesiklaas) ja naatriumhüdroksiidi lisamine tuhksideainega segule parendab betooni tugevuslikke omadusi tunduvalt, ning kõrgem molaarsus mõjutas survetugevust positiivses suunas. Samuti aktivaatori-sideaine suhte kõrgem suhe vähendas survetugevust läbi poorsuse tõstmise. Ilma naatriumsilikaadita saadi tunduvalt madalamad survetugevused. 3D printimisel tuleb arvestada, et liigne poorsus pole soodne ja tavalise lendtuha kasutamisel tsemendi asemel tuleb arvestada ehituskeemia kasutamisega.

1.3.2 Sekundaarsete sideainete kombineerimine tsemendiga

Lõuna-Aafrika vabariigis läbiviidud uuringus uuriti selliste 3D printitavate segude omadusi, kus suurel määral asendati tsemendi teiste sideainetega, milleks olid tööstusjääd. Kasutati kõrgahju räbu, lendtuha, mikrosilikat ja metakaoliini ja tsemendi asendusmäär oli 60%. Lisaks fikseeriti täitematerjali ja sideaine suhe 1,75 juures. [22]

Samuti tõestati ära, et 60% asendusmääraga on võimalik edukalt printida ja printitavaks kehaks oli toruristlõikega post diameetriga 250 mm, mille printimisel joone laius oli 30 mm ja kõrgus 10 mm. Parim tulemus saadi siis kui sideainest moodustas 60% kõrgahju räbu, ühe korruga suudeti printida 72 kihi kõrgune post, ilma et see kaotaks stabiilsuse

omakaalu mõjus tingitult. 40% lendtuha ja 20% metkaoliini kasutamisel saadi 50 kihi kõrgune post ja 50% lendtuha ja 10% mikrosilika juures 36 kihiline post enne stabiilsuse kadu. [22]

Survetugevuskatseid tehti silindritele ($\varnothing 70$, $h=140$ mm) kahes erinevas suunas "Direction 2" (kihtidega ristisuunas) ja "Direction 3" (printimise suunas avaldatud surve) millede kohta tehtud tabelitest selgub, et printimise suunas võtab printbetoon suuremat survet vastu. Survetugevuste suurim standardhälve (16,4%) saadi 7-päeva vanuselt kõrgahju räbu kasutades, kuid üldiselt 28-päeva vanustel kehadel olid hälvimised madalamad. [22]

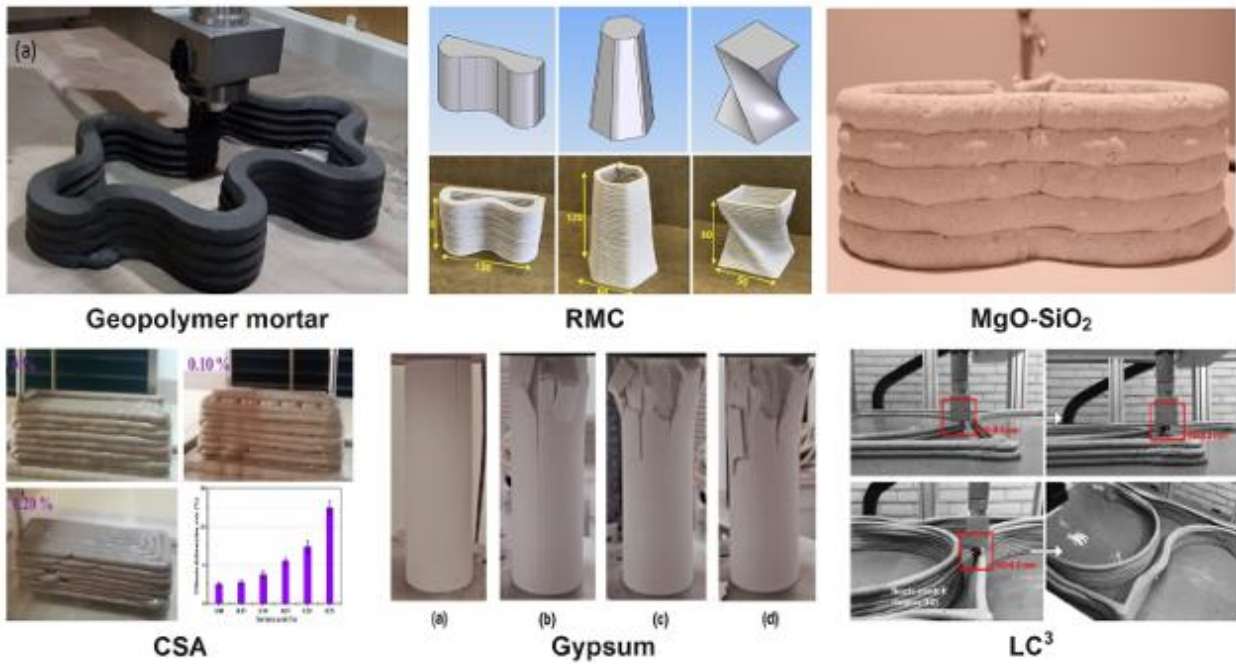
Segu	Survetugevus (MPa)			
	Suund 2		Suund 3	
	7-päeva	28-päeva	7-päeva	28-päeva
50FA10SF	30,5	31,1	35,4	36,3
40FA20MK ₆₀	25,1	37,9	34,2	38,6
60GGBS	33,7	43,1	28,8	55,5

Joonis 1.22 Silindriliste katsekehade survetugevused 7 ja 28 päeva vanuselt [22]

Silindriliste katsekehade tulemitelt nähtub, et suurel määral tsemendi asendamine (60%) tööstusjätmetega on võimalik 3D printimise tehnoloogia rakendamisel, et tagada keskkonnahoid ja majanduslik mõistlikkus.

1.3.3 Erinevate sideainete arengutest 3D betooni printimises

Tegelikkusest on veel palju erinevaid sideaineid lisaks tuhale, millega vähendada portlandtsemendi vajadust. Peng ja Unluer on enda artiklis kokku toonud hulga erinevaid teaduslikke uuringuid, kus on seda uuritud. Erinevateks sideaineteks, mida kokku koondati kujunesid geopolümeerid, reaktandid, MgO tsemendid, aluminaattsemendid, kipsi põhised ja lubjakiviga kaltsineeritud savil baseeritud tsementeeruvad materjalid (LC³). [23]



Joonis 1.23 prinditulemide erinevate sideainetega

Geopolümeeridel on kõrgem kuuma ja sulfaadikindlus, kui tavalisel tsemendil. Küll aga lendtuha ja kõrgahju räbu kasutamine peamise sideainena ei võimaldada prinditava keha piisavalt head ehitatavust ja selleks tuleb doseerida aktivaatoreid nagu naatriumhüdroksiid ja naatriumsilikaat. Kuid sellise ehituskeemia kasutamine nõuab eraldi tähelepanu, sest tegu ei ole ohutute kemikaalidega. [23]

MgO baasil tsemendiga printimise kohta on uuringutega leitud, et sellise segu kasutamine aitab printimise faasis hoida keha kuju. Samuti on leitud, et prinditult on magneesiumoksiidi põhised tsemendid prinditult pea kaks korda tugevamad, kui valatult. Tingitud oli see sellest, et printimisel tuli segu ühtlasem ning suurema pooride hulgaga tänu millele kiirenes karboniseerumise protsess läbi kõrgema süsinikdioksiidi difundeerumise kehasse. Samuti püsis segu printimise hetkel sobiliku voolavusega 60 minutit. [23], [24]

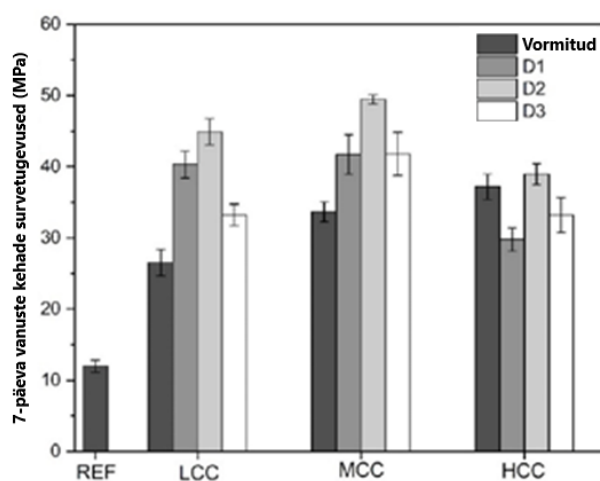
Kaltsium-aluminaattsemendiga on edukalt prinditud erinevaid keerukaid geomeetrilisi elemente. 3D printimisele sobivuse tagab ka see, et tänu kiirele tardumisele on võimalik rohkem kihte printida selliselt, ilma lisanduvate geomeetriliste hälvete tekkimisega. Ühes uuringus on välja toodud, et tardumine algab 20 min peale veega kokku segamist, ja lõpeb 40 minutiga. Sellise tardumisajaga on küllaltki keeruline edukalt printida ja on vaja pikendada seda protsessi. Selleks kasutati aeglustajaid ja pikeimaks alguse ajaks kujunes 157 min (0,42% aeglustaja osakaalu juures). [23], [25]

Puhtalt kipssideainega ei ole õnnestunud suuremaid kehasid printida, küll aga kunsti tegemiseks on igati sobilik kipsi kasutada. Puuduseks on tal hügroskoopsus ja aglomeratsioon, mis printimise protsessi raskendavad suurel määral. Küll aga on võimalik erinevate lisanditega reoloogilisi omadusi parendada nagu näiteks superplastifikaatoriga. [23]

Kaltsineeritud savi lubjakivi pulbriga 3D printimist on seni edukalt läbi viidud. Isegi on suuremaid eluhooneid prinditud antud sideainega. Kaltsineeritud savil on kõrgem putsolaanne aktiivsus, kui on seda lendatuhal ja kõrgahju räbul. Putsolaansust savil võimaldab tõsta kõrgematel temperatuuridel kaltsineerimine. [26]

Lähemalt on uuritud ka kaltsineeritud saviga lubjakivi pulbriga tsemendi (LC³) mõju segu prinditavusele, kus asendati portlandtsementi suurel hulgal, enam kui 60%. Kõrgem kogus lubjakivi ja kaltsineeritud savi vähendavad segu vajumit ja voolavust, mistõttu tuleb kindlalt lisada superplastifikaatori. Enam kui 75% asendusmäära juures ei ole tegu enam seguga, mida võiks hoonete ehituses kasutada. [27]

Kui eelmises lõigus tehtud uuring viidi läbi madalama klassi kaltsineeritud savi seguga, siis nüüd autor kirjeldab artiklit, kus uuriti madala (LCC), keskmise (MCC) ja kõrgema (HCC) klassi kaltsineeritud savi LC³ segudes. Kõrgema klassiga kaltsineeritud savi kasutamisel leiti, et too toob alla survetugevust kuid parendab segu voolavust tänu väiksematele osakestele. Keskmise klassiga kaltsineeritud saviga saadi kõrgeimad survetugevuslikud näitajad prinditud kehadel eri suundades. Samuti eri klasside savide kombineerimisel saab varieeruvaid tulemusi ja optimaalseimate suhete leidmiseks tuleb teha rohkem teadustööd. [26]



Joonis 1.24 3D prinditud betooni erinevates suundades koormamine (D1 – risti, D2 – paralleelselt ja D3 – külgsuunas printimissuunaga) kus LCC madala kvaliteediga kaltsineeritud savi, MCC keskmise kvaliteediga kaltsineeritud sav ja HCC kõrge kvaliteediga kaltsineeritud savi. [26]

2 KATSELINE OSA

Magistritöö katselise osa eesmärk on leida tuhksideaine mördi tugevuslikud omadused ja määrata veevajadus ning töödeldavus. Tsemendi asendusmääraks valiti 100% ja kasutati reaktiivset peent põletatud põlevkivi. Võrreldi ka fiibriga samaväärseid segusid, et missugust mõju polüetüleenist kiud avaldavad segudele. 3D printimisel on väga oluline saada õige töödeldavusega segu, et too oleks pumbatav ja kiht-kihi haaval ekstrudeeritaval seinal tagada püsivus. Kuna lõputöö tegemise ajal sai antud tootja 42,5 N tsement otsa ja ladudes polnud enam saadaval, siis otsustati asendada ühes retsepti 42,5 N tsement 52,5 N tsemendiga ja samuti tehti etalonsegule referentsiks proovisegu "S10E."

Kuna tegu on mördiga siis täitematerjalina kasutati ainult peentäitematerjali, mille suurim fraktsioon oli 1,2 mm. Katsetati ka erinevaid seguvahekordi 0-0,5 ja 0,5-1,2 fraktsiooniga liivadel. Oluline oli leida optimaalseim sõelaköver antud seguvahekorraga.

Katsetati kivinenud katsekehasid 3, 7, 14, 28 ja 56 päeva vanuselt. Survetugevuse katsed tehti kõikidel erinevatel vanustel. Äratõmbe katsed tehti 7, 28 ja 56 päeva vanuselt. Painde- ja survetugevuse prismad katsetati 7, 28 ja 56 päeva vanusel. Kaheksa-kujulised katsekehad katsetati tõmbele 28 ja 56 päeva vanuselt.

2.1 Katseplaan

1. Eeldatava materjali kulu leidmine
2. Ettevalmistused
 - a. Materjalide hankimine
 - b. Vormide ettevalmistus
3. Katsekehade valmistamine
4. Katseseadmete seadistamine katsetamiseks
5. Katsekehade mõõdistamine ja tugevusnäitajate määramine

2.2 Katsemetoodikad

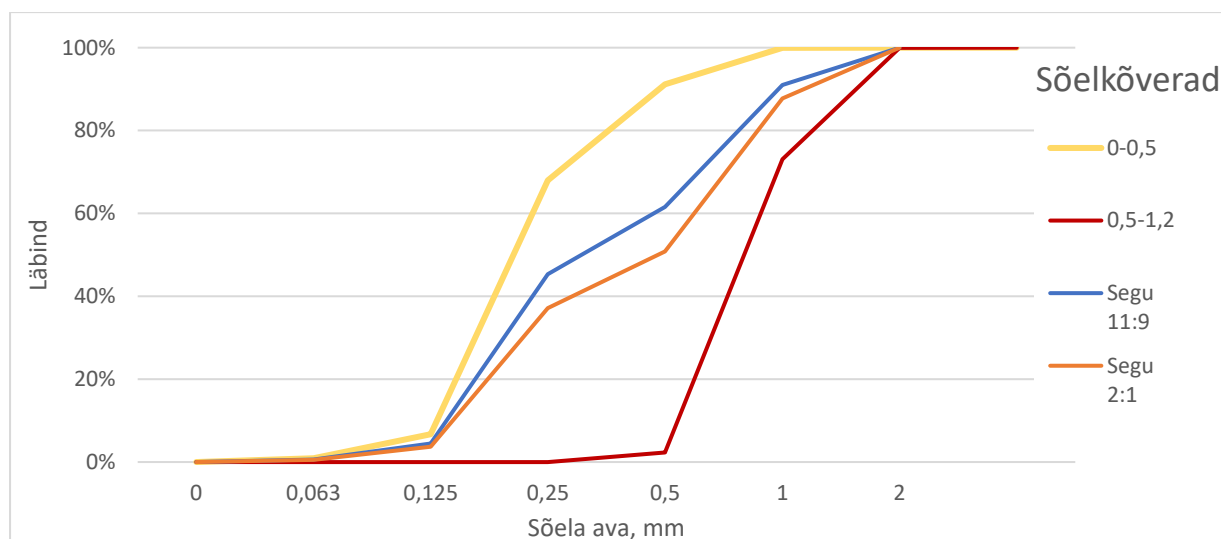
2.2.1 Kasutatud materjalid

Suures segistis valmistati korruga 57 kg segu ja hobartiga 3 kg. Peentäitematerjalina kasutati liiva fraktsioonidega 0-0,5 ja 0,5-1,2 mm. Sideaineteks oli erinevate tugevusklassidega tsemendid ja põletatud põlevkivi. Lisanditena kaustati pulbrilist plastifikaatori ja fiiberkiudu.

Tabel 2.1 Kasutatud materjalide spetsifikatsioon

Sideained	
CEM I 42,5 N	Schwenk super cement
CEM I 52,5 N	Scwenk ultra cement
Põletatud põlevkivi	Auvere 8 plokk (CFB meetod)
Peentäitematerjal	
0-0,5 kvartsliv	
0,5-1,2 kvartsliv	
Lisandid	
Plastifikaator	Peramin CONPAC 700
Fiiber	Polüetüleenist

Erinevate fraktsioonide katsed viidi läbi 1500 g katsemassiga ja sõeluti ühekordselt. Liivad sõeluti 10 minuti jooksul kasutades sõelasid avadega 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1 ja 2 mm. Segude sõelkõverad on leitud arvutuslikult.



Joonis 2.1 Liivade ja nende segude sõelkõverad

2.2.2 Katsekehade ja segude tähistamine

Segudel ja katsekehadel kasutati unikaalseid nimetusi eristamiseks. Retsept sai tähistatud "Sxe" või "Sxv" olenevalt kas tegu on etalon- või määratud vajumi seguga. Etalonsegu alaindeksiga "Sxe" oli juba varasemast vajalik veekogus paigas ja doseriiti otse etalonsegu järgu ja leiti vajum. Võrdluseks tehti indeksiga "Sxv" segud millel määrati nõutud vajum 150 ± 5 mm ja antud vajum tagab 3D printimiseks vajaliku töödeldavuse. Katsekehadel jookseb numeratsioon järjest. Paindekatsekehadel jookseb numeratsioon 1-9, kaheksakujulistel katsekehadel 1-6 ning kuubikutel servaga 100mm 1-24 kuhu hulka kuuluvad ni survetugevuse kuubikud kui ka äratõmbe katse kuubikud.



Joonis 2.2 Näited katsekehade tähistamisest [Autori erakogu]

2.2.3 Peentäitematerjali sõelkõvera optimiseerimine

Käesolevas lõputöös kasutati prinditavatele segudele fraktsioonidega 0-0,5 kuni 0,5-1,2 liivasid ja nende erinevate suhetega segusid. Liivade võimalikult tihedalt pakitud segud saadi optimiseeritud Andreasen ja Andersen ideaalkõvera järgi, lähendades arvutuslikke sõelkõveraid.

2.2.4 Mõrdi valmistamine betooniseguriga

Suurema mõrdikoguse valmistamisel sai kasutatud Soroto 40L-30 segistit. Kuivaine segati esmalt 10 minutit kuivalt ja seejärel doseeriti vesi 1 minuti jooksul ja segati seejärel märgsegu 10 minutit.

Tuhksideainega mõrdid tulid nidusad, seetõttu kleepusid betooniseguri seinte külge ja segu ei saanud piisavalt homogeniseeruda. Samuti tekkisid suured klombid segus. Peale betoonisegistis segamist lasti segu vanni. Tuli kasutada segutrelli, millega täiendavalt segati segu 5 minutit homogeenseks massiks ja lõhuti tekkinud klombid peale esmast segamist. Samuti täheldas autor, et segutrelli külge jääb palju fiibrit mistõttu tulid aeg ajalt visplilt kiudusid eemaldada ja panna tagasi segusse. Vann kus segu segati täiendavalt segutrelliga, niisutati eelnevalt sisepind märja lapiga ja samuti niisutati ka vispel.

Katseseadmed:

- 1) Kaal KERN EMS 6K0.1, kaalumistäpsusega 0,1g;
- 2) Kellu
- 3) Ämbrid, vannid, lapid niisutamiseks
- 4) Betooni segisti Soroto 40 L-30

Katsekäik:

- 1) Mördi kuivad komponendid puistati suuruse järgi: jämeliiv, peenliiv, lisandid ja tsement / tuhk
- 2) Käivitati segisti ja jälgiti kella
- 3) Kuivsegul lasti seguneda 10min
- 4) 1 minuti jooksul doseeriti vesi segusse
- 5) Segul lasti seguneda 5 minutit ning peatati ja trumli pindadel segunemata osa juhiti segisti keskele kelluga.
- 6) Segisti taaskäivitati ja lasti segul seguneda 5 minutit. Jooksvalt olenevalt segust tuli viimase 5 minuti jooksul siis täiendavalt segunemata segu aidata kelluga.
- 7) Segisti peatati ja segu võeti välja.
- 8) Tuhksideaine puhul segati segutrelliga täiendavalt 5 minutit.



Joonis 2.3 Mördi valmistamine betoonisegistiga ja vann kus segati täiendavalt tuhasegusid [Autori erakogu]

2.2.5 Mördi valmistamine planetaarse segistiga "Hobart"

Planetaarse segistiga "Hobart" mördisegu valmistamisel lähtuti standardist EVS-EN 480-1:2023 ja juhendaja soovitustest. Summarne segamisaeg oli 3 minutit ja erinevused standardist said kokkulepitud juhendajaga, et oleks optimaalseim antud lisandite ja

tuhksideainega segu segada. Segude komponendid konditsioneeriti enne katsekäiku 20 ± 2 °C juures. [28]

Katseseadmed:

- 1) Kaal KERN EMS 6K0.1, kaalumistäpsusega 0,1g;
- 2) Segisti, mis täidab standardi EVS-EN 196-1:2016 nõudeid [29]
- 3) Kell, täpsusega ± 1 s

Katsekäik:

- 1) Kuivsegu segati eelnevalt 2 minutit
- 2) Segisti anum ja vispel niisutati niiske lapiga
- 3) Valati anuma põhja kogunenud vesi välja
- 4) Kogu vesi doseeriti anumasse
- 5) Doseeriti kogu kuivsegu vee peale
- 6) Käivitati segisti madalatel pööretel ning segati 30 sekundit
- 7) Peatati segisti ja kraabiti pindadelt segunemata jäänud segu anuma keskele
- 8) Segati veel 30 sekundit madalatel pööretel
- 9) Peatati segisti

2.2.6 Mördi veevajaduse määramine

Vastavalt standardile EVS-EN 1015-3:2004 sai määratud mördi veevajadus [30]. Erinevused standardist said kokkulepitud juhendajaga. 3D prinditava segu valguvuseks sai võetud 150 ± 5 mm valguvuse määramisel. Tehti 10 lööki raputuslaual ja katse sai sooritatud maksimaalselt 3 minuti jooksul. Erinevalt standardist niisutati kõiki pindasid millega mördisegu kokku puutus katsekäigus.

Katseseadmed:

- 1) Tüvikoonuse kujuline vorm, mis vastab standardile EVS-EN 196-1:2016 [29].
- 2) Tihendusnui.
- 3) Raputuslaud vastavalt standardile EVS-EN 196-1:2016 [29].
- 4) Nihik täpsusega 0,1mm.
- 5) Pahtlilabidas tasandamiseks

Katsekäik:

- 1) Mört segati vastavalt eelnevas peatükis kirjeldatule.
- 2) Raputuslaua ja tüvikoonuse vormi pinnad niisutati lapiga.

- 3) Tüvikoonuseline vorm asetati raputuslaua ketta tsentrisse.
- 4) Vorm fikseeriti paika käega ja täideti kahes võrdses kihis niisutatud lusikaga. Mõlemaid kihte tihendati 10 korda niisutatud nuiaga, selliselt et teist kihti tihendades ei ulatu nui alumisse kihti.
- 5) Vormi pealt eemaldati üleliigne mört ja pealmine pind tasandati pahtlilabidaga ja seejärel tõsteti vorm aeglases tempos otse üles.
- 6) Raputuslauaga tehti 1 löök sekundis ja selliselt 10 lööki.
- 7) Laialivalgunud mört mõõdeti mehaanilise nihikuga ja kaks teineteisest ristuvat diameetrit, millede aritmeetiline keskmine on segu vajum.

2.2.6.1 Tsementsideainega mörtide retseptid ja veevajadused

Retsept		S3e				S3v			
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 II 42,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	652	50,0%	19,000 kg	6,129 L	661
0-0,5 liiv	2650	66,7%	25,346 kg	9,565 L	870	66,7%	25,346 kg	9,565 L	882
0,5-1,2 liiv	2650	33,3%	12,654 kg	4,775 L	434	33,3%	12,654 kg	4,775 L	440
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	297	14,5%	8,265 kg	8,265 L	288
Fiiber	500	0,00%	0,00 g	0,000 L	0,000	0,00%	0,00 g	0,000 L	0,000
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,130	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,132
Vajum raputuslaual, mm		247				145			

Tabel 2.2.6.1.1 Tsemendiga betooni retseptid

Retsept		S4e				S4v			
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 II 42,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	651	50,0%	19,000 kg	6,129 L	653
0-0,5 liiv	2650	54,6%	20,748 kg	7,829 L	711	54,6%	20,748 kg	7,829 L	713
0,5-1,2 liiv	2650	45,4%	17,252 kg	6,510 L	591	45,4%	17,252 kg	6,510 L	593
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	297	15,0%	8,550 kg	8,550 L	294
Fiiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,976	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,980
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,130	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,131
Vajum raputuslaual, mm		159				146			

Tabel 2.2.6.1.2 Tsemendiga betooni retseptid

Retsept		S5e				S10e			
Kogus		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³		2,0 L	3,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM II 52,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	652	50,0%	1,000 kg	0,323 L	651
0-0,5 liiv	2650	54,6%	20,748 kg	7,829 L	712	66,7%	1,334 kg	0,503 L	868
0,5-1,2 liiv	2650	45,4%	17,252 kg	6,510 L	592	33,3%	0,666 kg	0,251 L	433
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	297	15,2%	0,456 kg	0,456 L	297
Fiiber	500	0,00%	0,00 g	0,000 L	0,000	0,05%	1,50 g	0,003 L	0,976
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,130	0,02%	0,20 g	0,000 L	0,130
Vajum raputuslual, mm		171				135			

Tabel 2.2.6.1.3 CEM I 52,5 N tsemendiga retseptid

Retsept		S5v			
Kogus		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM II 42,5 N	3100	50,0%	19,000 kg	6,129 L	660
0-0,5 liiv	2650	54,6%	20,748 kg	7,829 L	720
0,5-1,2 liiv	2650	45,4%	17,252 kg	6,510 L	599
Vesi kuivaine järgi	1000	14.6%	8,322 kg	8,322 L	289
Plastifikaator	500	0,02%	7,60 g	0,015 L	0,005
Vajum raputuslual, mm		147			

Tabel 2.2.6.1.4 Tsemendiga betooni retsept

Retsept		S2v			
Kogus		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
CEM II 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			

Tabel 2.2.6.1.5 Tsemendiga etalon retsept [31]

2.2.6.2 Tuhksideainega mörtide retseptid ja veevajadused

Retsept		S6e2=S6v				S8e2			
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
Tuhk	3000	50,0%	19,000 kg	6,333 L		50,0%	19,000 kg	6,333 L	
0-0,5 liiv	2650	66,7%	25,346 kg	9,565 L	807	54,6%	20,748 kg	7,829 L	661
0,5-1,2 liiv	2650	33,3%	12,654 kg	4,775 L	403	45,4%	17,252 kg	6,510 L	549
Vesi kuivaine järgi	1000	18,7%	10,659 kg	10,659 L	339	18,7%	10,659 kg	10,659 L	339
Fiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,908	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,908
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,121	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,121
Vajum raputuslaual, mm		143				140			

Tabel 2.2.6.2.1 Tuhksideainega betooni retsept

Retsept		S8v				S9e2			
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
Tuhk	3000	50,0%	19,000 kg	6,333 L		50,0%	19,000 kg	6,333 L	
0-0,5 liiv	2650	54,6%	20,748 kg	7,829 L	663	54,6%	20,748 kg	7,829 L	662
0,5-1,2 liiv	2650	45,4%	17,252 kg	6,510 L	551	45,4%	17,252 kg	6,510 L	550
Vesi kuivaine järgi	1000	18,5%	10,556 kg	10,556 L	337	18,7%	10,659 kg	10,659 L	340
Fiber	500	0,05%	28,50 g	0,057 L	0,911	0,00%	0,00 g	0,000 L	0,000
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,121	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,121
Vajum raputuslaual, mm		145				152			

Tabel 2.2.6.2.2 Tuhksideainega betooni retsept

Retsept		S9v			
Kogus		38,0 L	57,0 kg	1500 kg/m ³	
	Tihedus, kg/m ³	%	Doseering	Maht	kg/m ³
Tuhk	3000	50,0%	19,000 kg	6,333 L	
0-0,5 liiv	2650	54,6%	20,748 kg	7,829 L	662
0,5-1,2 liiv	2650	45,4%	17,252 kg	6,510 L	551
Vesi kuivaine järgi	1000	18,7%	10,653 kg	10,653 L	340
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,121
Vajum raputuslaual, mm		150			

Tabel 2.2.6.2.3 Tuhksideainega betooni retsept

Retsept		S6e				S7e2			
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
Tuhk	3000	50,0%	19,000 kg	6,333 L		50,0%	19,000 kg	6,333 L	
0-0,5 liiv	2650	66,7%	25,346 kg	9,565 L	864	66,7%	25,346 kg	9,565 L	809
0,5-1,2 liiv	2650	33,3%	12,654 kg	4,775 L	431	33,3%	12,654 kg	4,775 L	404
Vesi kuivaine järgi	1000	15,2%	8,664 kg	8,664 L	295	18,7%	10,659 kg	10,659 L	340
Plastifikaator	500	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,129	0,02%	3,80 g	0,008 L	0,121
Vajum raputuslual, mm		103				149			

Tabel 2.2.6.2.4 Tuhksideainega etalon retseptid [31]

2.2.7 Katsekehade valmistamine

Kuubikud servaga 100mm

Kuubikud katseteks valmistati servaga 100 mm. Valmistati vastavalt standardile EVS-EN 12390-2:2019 [32] ja vibrolaua tihendati selliselt kuniks suurel määral õhumulle ei eraldunud. Eelnevalt olid vormid vormiõliga õlitatud ja teistpidi keeratud, et üleliigne õli välja valguks, vormiõli peab olema sellises koguses vormide pindadel, et kui näpuga tõmmata, ei jää mingisugust jälge. Peale vibreerimist pandi kehad polüetüleenist kile alla ja järgmisel päeval eemaldati suruõhuga vormist ja pandi vette kivinema. Põletatud põlevkivi vibreeriti mõnevõrra vähem, kuna segu tihenes kiirelt ja ülealusel tihendamisel oli näha liigset vee segregeerumist vormi seintele. Igale retseptile tehti 24 katsekeha ja selleks kasutati 12 vormi. 15 katsekehaga tehti survetugevuse katsed ja ülejäänud 9-ga tehti äratõmbe katsed.

Töövahendid:

- 1) Kellu
- 2) Pahtlilabidas
- 3) Niiske lapp
- 4) Vormiõli
- 5) Ämber
- 6) Elektrooniline kaal KERN
- 7) Betoonisegisti
- 8) Vibrolaud

9) Kuubikute vormid, plastikust

Prismad

Painde- ja survetugevuse katsekehad said valmistatud EVS-EN 196-1:2016 [29] kohaselt. Katsekehad milleks olid prismad on mõõtmetega 40 mm x 40mm x 160 mm. Vormid täideti kahes kihi ja mõlemat kihti tihendati vähemalt 20 korda. Hiljem kehad kaeti polüetüleen kilega ja peale 24h möödumist asetati vette kivinema. Igale retseptile tehti 9 prismat ja selleks kasutati 3 vormi.

Töövahendid:

- 1) Kellu
- 2) Pahtlilabidas
- 3) Niiske lapp
- 4) Vormiõli
- 5) Elektrooniline kaal KERN
- 6) Betoonisegisti
- 7) Tihendusnui
- 8) Prismade vormid, metallist

Kaheksa

Tömbekatsekehad, "8" kujulised kehade valmistamisel lähtuti standardist EVS-EN 12390-2:2019 [32]. Erinevalt standardist kasutati lööklaua asemel tihendusnui, millega tihendati 8 vormi sees kahes kihis ja vähemalt 25 löögiga ning lõpus pind siluti. Vormid olid eelnevalt õlitatud vormiõliga õrna kihiga ja kuna vormid koosnesid kahest eraldiseisvast osast tuli need osad omavahel fikseerida pitskruvidega. Antud lõputöös kasutati nii metallist, kui ka XPS-st tehtud vorme. Hiljem kehad kaeti polüetüleen kilega ja peale 24h möödumist asetati vette kivinema. Igale retseptile tehti 6 katsekeha ja selleks kasutati 2 vormi.

Töövahendid:

- 1) Kellu
- 2) Pahtlilabidas
- 3) Niiske lapp
- 4) Vormiõli
- 5) Elektrooniline kaal KERN
- 6) Betoonisegisti

- 7) Tihendusnui
- 8) Pitskruvi
- 9) Vormid, metallist ja XPS



Joonis 2.4 Tõmbe- ja paindekatsekehade vormide ettevalmistus [Autori erakogu]

2.2.8 Katsekehade tiheduse meetodika

Katsekehade tihedused määrati Archimedese hüdrostaatilise kaalumisega, milleks kasutati valemit:

$$\rho = \frac{m_1 \cdot \rho_w}{m_1 - m_2} \cdot 1000 \quad 2.1$$

Kus ρ – Katsekeha tihedus, kg/m³;
 ρ_w – Vee tihedus toatemperatuuril, 1 kg/m³;
 m_1 – Katsekeha kaal õhus, g;
 m_2 – Katsekeha kaal vees, g;



Joonis 2.5 Katsekehade tiheduste määramine [Autori erakogu]

Katseseadmed:

- 1) Elektrooniline kaal KERN
- 2) Veeämber
- 3) Metallist riputi
- 4) Joogivesi

Katsekäik:

- 1) Katsekeha kaaluti vette
- 2) Katsekeha kaaluti õhus

2.2.9 Kuubi survetugevuse metoodika

Kuubikud servaga 100 mm katsetati vastavalt standardile EVS-EN 12390-3:2019 [33]. Katsekehadel mõõdeti ka kõrgused tasandatud pinnast nihikuga täpsusega 0,01 mm. Katsekehad katsetati niiskelt ja ilma et kuubikute tahkudel oleks näha kuivamismärke. Kuubikud tsentreeriti hüdraulilise pressi vahele ja koormati ühtlaselt $0,6 \pm 0,2$ MPa/s pärast algkoormuse rakendamist, mis ei ületanud 30% purustavast koormusest, vastavalt standardi EVS-EN 12390-3:2019 soovitudele [33]. Survekatsemasin, millega kuubikud purustati vastab standardile EVS-EN 12390-4:2019 [34]. Kuubikud purustati hüdraulilise

pressiga 3, 7, 14, 28 ja 56 päeva vanuselt ja iga retsepti kohta katsetati 3 katsekeha. Kui survetugevus erines enam kui 10% siis seda tulemust arvesse ei võetud survetugeuse aritmeetilise keskmise arvutamisel. Katsekehad asetati hüdraulilise pressi plaatide vahele selliselt, et silutud pind oli katse läbibviija poole.

Survetugevus arvutati valemiga:

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

kus

f_c – Betooni survetugevus, MPa;

F – Suurim saavutatud koormus, N;

A_c – Katsekeha ristlõikepind, mis võttis vastu mõjuvat survepinget



Joonis 2.6 Hüdrauliline press survetugevuse määramiseks [Autori erakogu]

Katseseadmed:

- 1) Hüdrauliline press
- 2) Puhastushari

Katsekäik:

- 1) Kuubik asetatakse raudplaatide vahele
- 2) Katsekeha purustatakse
- 3) Press puhastatakse purust järgmiseks katseks

2.2.10 Prisma painde- ja survetugevuse meetodika

Prismad katsetati vastavalt standardi EVS-EN 196-1:2016 [29] soovitude kohaselt. Katsekehad vormiti mõõtudega 160 mm x 160 mm x 40 mm. Samuti mõõdeti katsekehade mõõtmed elektroonilise nihikuga, täpsusega 0,01 mm. Iga retsepti kohta katsetati seerias 3 katsekeha. Esmalt tehti paindekatse ja tulemus pandi kirja seejärel kaks tekkinud poolt pressiti survepressiga. Prismad katsetati 3, 7, 14, 28 ja 56 päeva vanuselt ja kehad asetati stendile selliselt, et silutud pind vaatas katse läbiviija poole.

Paindekatsetel koormati käsitsi kiirusega 50 ± 10 N/s kuni katsekeha murdus. Kehad katsetati niiskelt ja selliselt, et prisma pinnal ei oleks kuivamismärke.

Paindetugevus arvutati valemiga:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{b^3}$$

kus

R_f – paindetugevus, MPa;

F_f – prisma keskosalerakendatud purustav koormus, N;

L – tugedevaheline kaugus, mm;

b – ristlõike külje pikkus, mm;

Kaks eraldiseisvat prisma osa katsetati survetugevusele selliselt, et ei oleks näha kehade pinnal kuivamismärke. Survetugevuse katsetel koormati käsitsi sujuvalt kiirusega 2400 ± 200 N/s kuni katsekeha purunemiseni ja peeti silmas, et koormamiskiirus ei tohi vähendada kuna see võib mõjutada lõpptulemust üsna märgatavalt.

Survetugevus arvutati valemiga:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

kus

R_c – survetugevus, MPa;

F_c – purustav koormus, N;

1600 – katsekeha / plaatide survepindala, mm²;

Kui painde- või survetugevus erines enam kui 10% siis seda tulemust arvesse ei võetud survetugeuse aritmeetilise keskmise arvutamisel. Antud nõue tuleneb standardist EVS-EN 196-1:2016 [29].



Joonis 2.7 Painde- ja survetugevuse hüdrauliline press "Strassentest " [Autori erakogu]

Katseseadmed:

- 1) Hüdrauliline press
- 2) Puhastushari

Katsekäik:

- 1) Prisma purustatakse paindele
- 2) Prismast tekkinud 2 keha purustatakse survele
- 3) Press puhastatakse purust järgmiseks katseks

2.2.11 Betooni väljatõmbekatse meetodika

Väljatõmbe katsed tehti vastavalt standardi EVS-EN 1015-12:2016 [35] kohaselt. Kuna segudes jämetäitematerjali ei kasutatud, vaid tehti mörti siis sobib antud standard katsemetoodika lähtematerjaliks. Katsekehadeks olid standardised 100 mm servaga kuubikud, samad mis kasutati ka survetugevuse katsetel. Katsed teostati 7, 28 ja 56 päeva vanustel kehadel. Kuupidesse freesiti $\varnothing 50$ mm katsepind.

Freesitud katsepind freesiti nurklihvija külge monteeritud teematpuuriga 3-9 mm sügavuseks. Puuriti kohe peale vannist välja võtmist, et tolmu tekiks võimalikult vähe ja ruumis kasutati ventilatsiooni tolmu eemaldamiseks siseruumist välisruumi. Peale freesimist katsepind karestati liivapaberiga (P180 karedus) ja suruõhuga puhuti tolmu pinnalt ja harjati üle. Seejärel kasutati kahekomponentset epoksiidliimi, millega liimiti metallist silinder katsepinnaga kokku. Epoksiid doseeriti koguses, selliselt et ei valgaks freesitud soonde, kuna sellisel juhul tekib tugevdav liimisein, mis mõjutab katsetulemust. Silindrit keerutati epoksiidiga päri- ja vastupäeva 10 korda, et epoksiid jaotuks ühtlaselt pinna peale, jälgiti minut epoksiidi tardumisel, et silinder ei nihkuks freesitud pinna pealt tulenevalt aluspinna ebatasasustest. Peale liimimist pandi katsekehad elektrikalorifeeri ette kuivama ja selliselt 12 h, et vältida liimist purunemist ja kvaliteetsete katsetulemuste tagamiseks.



Joonis 2.8 Äratõmbe katsekehade kuivatamine [Autori erakogu]

Tõmbetugevus arvutati EVS-EN 1015-12:2016 [35] kohaselt ja täpsusega 0,1 MPa ning kolme katsetulemuse põhjal arvutati kõikidele segudele aritmeetiline keskmine. Valem nakketugevuse arvutamiseks:

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

kus

f_u – nakketugevus, MPa;

F_u – purustav koormus, N;

A – silindri katsekeha pindala, mm²;



Joonis 2.9 Tüüpiline äratõmbekatse vaatepilt [Autori erakogu]

Katseseadmed:

- 1) Pull-off katseseade
- 2) Nurklihvija monteeritud teemantpuuriga
- 3) Liivapaber
- 4) Kahekomponentne epoksiidliim
- 5) Diameetriga 50 mm terasest silindrid
- 6) Puhur

Katsekäik:

- 1) Teemantpuuriga freesiti 50 mm diameetrine katsepind
- 2) Katsepind karestati ja puhastati nakke tagamiseks
- 3) Epoksiid doseeriti terasest silindri peale

- 4) Silindrit keerati päri- ja vastupäeva 10 korda
- 5) Katsekeha liimitud silindriga asetati puhuri ette kuivama 12h
- 6) Pull-off seade fikseeriti silindri külge
- 7) Katseseadmel suurendati koormus kuniks betoon purunes tõmbele
- 8) Fikseeriti katsetulemus, jälgides purunemispilti

2.2.12 kaheksa tõmbekatse meetodika

Kuna otseselt Eesti pole käsitletud üheski standardis kaheksa tõmbekatse meetodikat, siis lähtuti standardist EVS-EN 196-1:2016 [29] ja juhendaja suusõnalistest kokkulepetest. Kaheksa-kujulised kehad katsetati nii 28 kui ka 56-päeva vanuselt. Mõlemas seerias oli 3 katsekeha ning arvutati 3 katsekeha aritmeetiline tõmbetugevuse määramisel. Tõmbetugevus väljendatakse täpsusega 0,1 MPa. Katsekehadel mõõdeti pindala punktist, kust saadi väikseim laius ja paksus ning see järel arvutati pindala. Kaheksa-kujuliste katsekehade servad lihviti tasaseks külgpindadega, mis puutusid kokku katseseadme terasfiksaatoritega et tagada tulemuste kvaliteet.

Valem tõmbetugevuse arvutamiseks on järgmine:

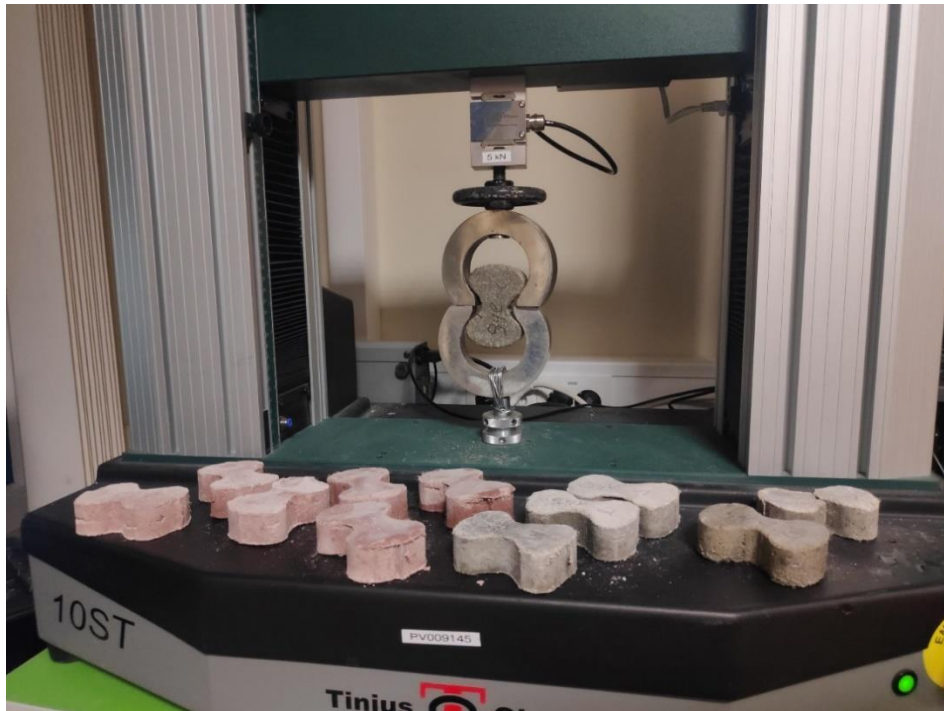
$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

kus

f_u – tõmbetugevus, MPa;

F_u –purustav koormus, N;

A – Katsekeha pindala keskel, mm²;



Joonis 2.10 Tõmbekatsekehade katsetamine [Autori erakogu]

Katseteks kasutati Tinius Olsen 10ST elektromehaanilist testimise seadet, millega on võimalik koormata kuni 10 kN. Seadmele on arendatud ka tarkvara, millega määrati koormamise kiirus ja liigutati rauast fiksaatoreid. Altpoolt seoti rauast fiksaator traadiga jäigalt kinni. Peale 4 retsepti seeria katsetamist leiti, et on mõistlik traadi uuesti kinni siduda kuna esines traadi voolavust ja mis muutis alumise sõlme liigendiks.

Katseseadmed:

- 1) Elektromehaaniline katseseade
- 2) Lihvkivi

Katsekäik:

- 1) Tõmbekatsekeha asetati terashaaratsi vahele
- 2) Tarkvaraga anti käsklus katse alustamiseks
- 3) Katsekeha koormati tõmbele kuni purunemiseni

3 KATSETULEMUSED

3.1 Tsementsideainega 2:1 liiva suhtega betoon

Autor võrdleb selles peatükis retsepte tähisega S2v, S3e, S3v ja S10e vastavalt kahe erineva liiva osakaaluga 2:1 ehk 0-0,5 liiva osakaal 66,7% ja 0,5-1,2 osakaal 33,3%. Sideaineks oli CEM I 42,5, ainsa erandina oli segul S10e CEM I 52,5 N. [31]

3.1.1 Survetugevus

3 päeva vanustel katsekehadelt järeldeb, et kõrgema survetugevusega tsemendi puhul saadi 160% suurem survetugevus kui antud graafiku madalaim väärtus. CEM I 42,5N tsemendiga segudel, kus fiibrit pole kasutatud on tugevuse kasv ühtlasem, kui ilma fiibrita segul. 3 päevastel katsekehadel saavutati 70-75% survetugevus, mis saadi 28 päeva vanustel kehadel, v.a fiibriga lisaveeta betoonil millega saadi 53% varajases eas. [31]

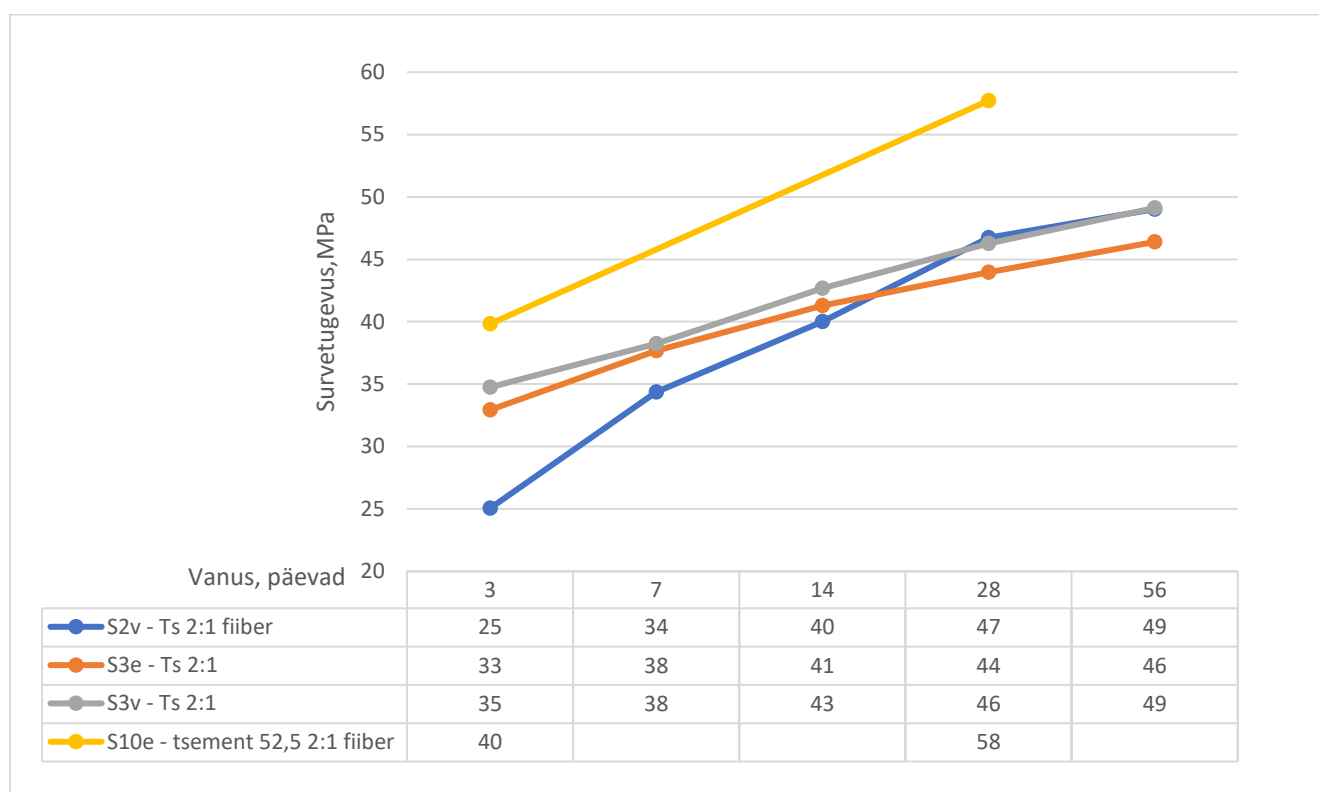
7 päeva vanustel kehadel on kahel retseptil survetugevus sama ja S2V on ka ühtlustunud eelnimetatud retseptidega ja fiibriga segul oli 12% madalam survetugevus kui ilma fiibrita betooniretseptidel. Kõige enam suurenes survetugevus lisaveeta fiibriga sega – 36% mis on tõenäoliselt tingitud ka sellest, et varajane survetugevus 3 päevasel seerial oli üks väiksemaid. Fiibrita betoonide survetugevused niivõrd palju ei suurenenud – lisaveega retsepti survetugevus suurenes 15% ja lisaveeta betoonil 9%. Tingitud on see sellest, et lisaveega fiibrita retsepti suurema vesitsemmentteguri tõttu tuli varasemas eas väiksem survetugevus. [31]

14 päeva vanustel katsekehadel erinevate retseptide survetugevuste erinevused on väiksemad, fiibriga segu survetugevuse ei ole niivõrd palju madalam kui fiibrita segudel, erinevus suurima survetugevusega segul on 8%. Samuti järeldeb, et väiksema veekogusega S3v suurem survetugevus on tingitud sellest, et tegu on vajumiseguga ja kasutati vähem vett. Täiendava 7 päeva kivilnemisega suurenes enim fiibriga lisaveeta betooni survetugevus ja 18% võrra. Fiibrita retseptidega seeriast selgub, et lisaveeta betooni survetugevus suurenes 13% ja lisaveega 8%. [31]

28 päeva vanustel katsekehadel on fiibrita segude erinevus sama ehk 5%, kuid fiibriga segu survetugevus on 7% kõrgem, varasemast oli eelnimetatud segu survetugevus teistest madalaim. Samuti nähtub, et kõrgema survetugevusega CEM I 52,5N tsemendi kasutamisel saavutati kõrgeim survetugevus, 24% kõrgem madalamaist tulemusest. Samuti ka selles seerias kasvas enim fiibriga lisaveeta betooni survetugevus – 18% sama

ajaga fiibrita retseptide survetugevuste kasvud mõnevõrra aeglustusid, mis on tingitud ka sellest, et maksimaalne võimalik kiire survetugevuse on saavutatud. [31]

56 päeva peale kivinemist nähtub, et suurima veekogusega fiibrita segul on kõige madalam survetugevus, ülejäänud kahel segul on survetugevused samad. Lisaks veel on survetugevuse kasv tunduvalt väiksem, täiendavalt kasvas survetugevus 4%. Lisa 28 päevaga on survetugevuste kasv aeglustunud ja selle perioodiga kasvasid vaadeldavatel retseptidel survetugevus 2-3 MPa kuna võimalik maksimaalne survetugevus saavutati 28 päevaga, muidugi teoreetiliselt jääbki betooni survetugevus kasvama lõpmatu pika perioodiga, kuid kasv jääb proportsionaalselt väiksemaks. [31]



Joonis 3.1 Tsementsideainega 2:1 liiva suhtega betooni survetugevus [31]

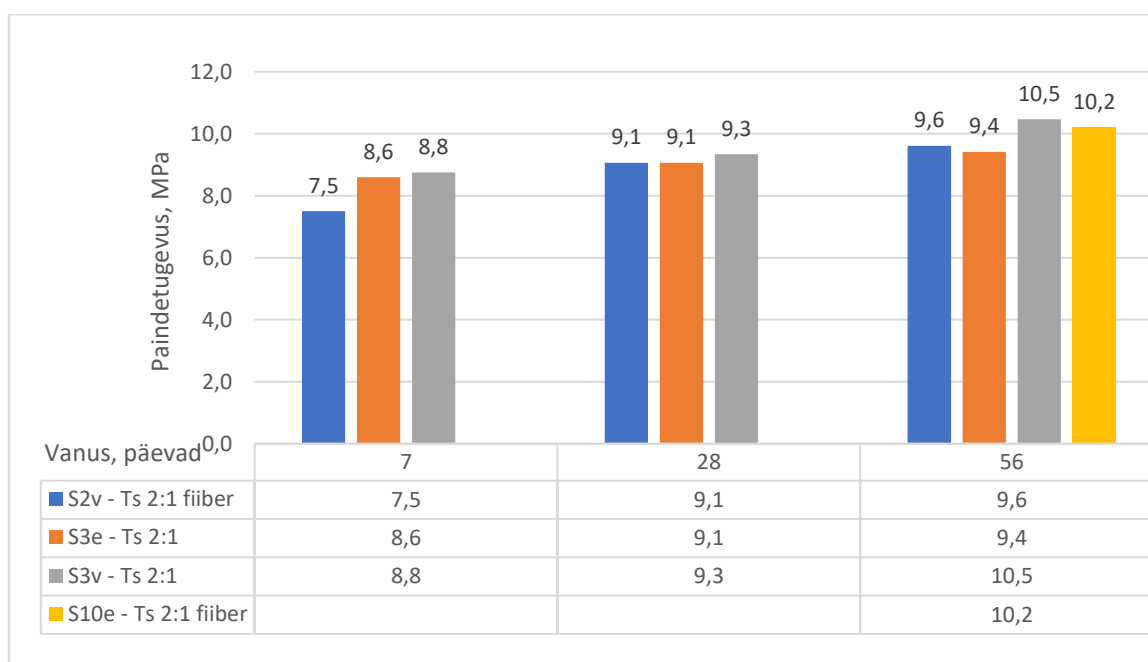
3.1.2 Paindetugevus

7 päeva vanustel katsekehadel on kõrgema veekogusega retseptil 2,3% madalam paindetugevus kui väiksema veekogusega retseptil. Lisaks veel väiksema veekogusega retseptil on 17% kõrgem paindetugevus, kui on seda fiibriga segul. [31]

28 päeva kivilinenud kehadel on kõigil kolmel võrreldaval retseptil paindetugevuste erinevused väiksemad, kõige kõrgem väärtus erineb 2% teistest. Samuti on näha, et väiksema veekogusega fiibrita betoonil on kõrgem tugevus, kui on seda suurema veekogusega betoonil. Võrreldes 7 päeva seeria paindetugevuse tulemusi, siis täiendava

kivinemise perioodiga suurenes enim fiibriga lisaveeta betoon – 21% mis on tingitud ka sellest, et varasemas eas oli sellel betoonil ühtlasi kõige madalam paindetugevus. Fiibriga segude hulgast kasvasid mõlemal betoonil paindetugevused sama palju – 6%. [31]

56 päevastel kehtel nähtub, et madalama veekogusega betoon on 12% suurema survetugevuse kui suurema veekogusega betoon ja 9% kõrgem kui fiibriga suurema veekogusega betoonil ning 3% suurem CEM I 52,5 N tsemendiga tehtud betoonist. Täiendava 28 päeva kivinemisega on betoonide paindetugevused suurenenud, küll aga aeglasema tempoga. Enim kasvas selle perioodiga fiibriga lisaveeta betoon – 13% ja kõige vähem tõusis fiibriga lisaveega betooni paindetugevus – 3%. [31]



Joonis 3.2 Tsementsideainega 2:1 liiva suhtega betooni paindetugevus [31]

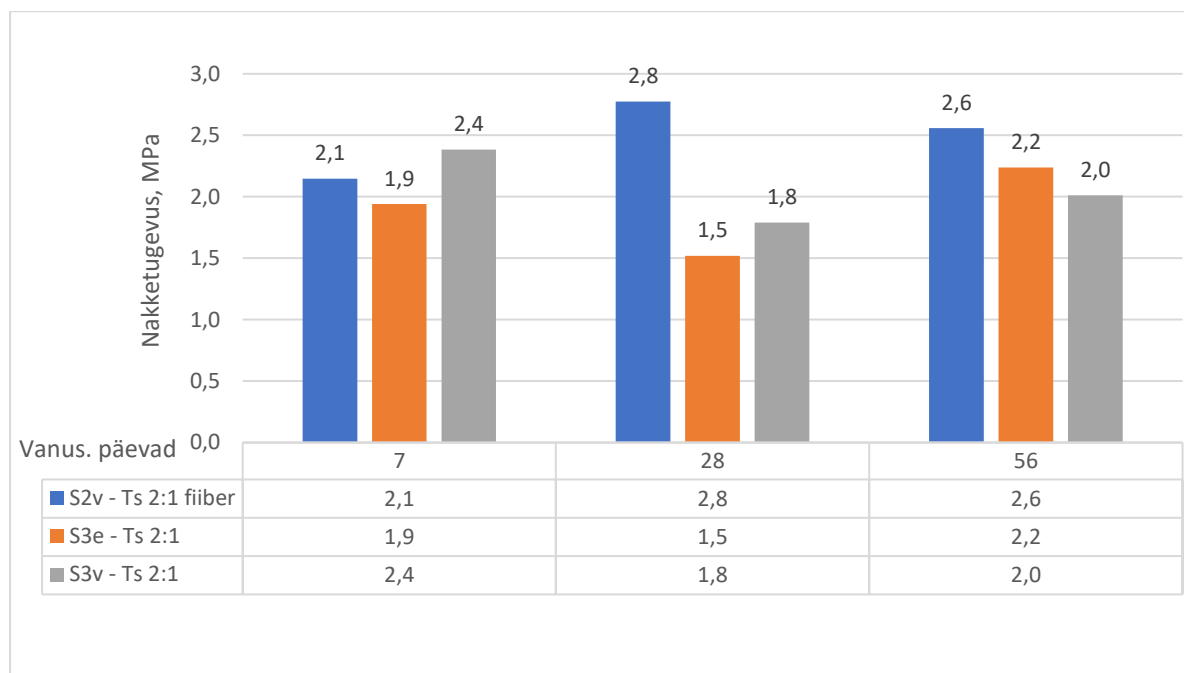
3.1.3 Nakketugevus

7 päeva katseerial madalama veekogusega betoonil on 26% kõrgem nakketugevus kui kõrgema veekogusega betoonil ja 14% kõrgem nakketugevus, kui fiibriga betoonil. Fiibriga retsept andis 11% kõrgema nakketugevuse, kui kõrgema veekogusega fiibriga retsept. [31]

28 päeval seerial saavutati kõrgeim nakketugevus fiibriga segul ja 56% kõrgem kui madalama veekogusega segul. Kõrgema veekogusega segul saadi 20% madalam nakketugevus kui madalama veekogusega fiibriga segul. Ainus retsept millel nakketugevus täiendava kivinemise perioodiga suurenes oli fiibriga lisaveeta betoon – nakketugevus

kasvas 33%. Ülejäänud kahel retseptil aga vähenes, mis viitab sellele et kas katseid tuleb korrata või on see põhjustatud betooni heterogeensest struktuurist. [31]

56 päevastel katsekehadel oli kõrgeim nakketugevus fiibriga betoonil ja erinevus oli 30% madalama veekogusega retseptiga võrreldes. Fiibriga retsept oli samuti 18% kõrgema nakketugevusega, kui kõrgema veekogusega fiibrita retseptil. Võrreldes 28 ja 56 päeva vanuste katsekehade nakketugevuste andmeid, suurenes fiibrita betoonidel nakketugevus enim, samal ajal fiibriga betoonil see aga vähenes. [31]



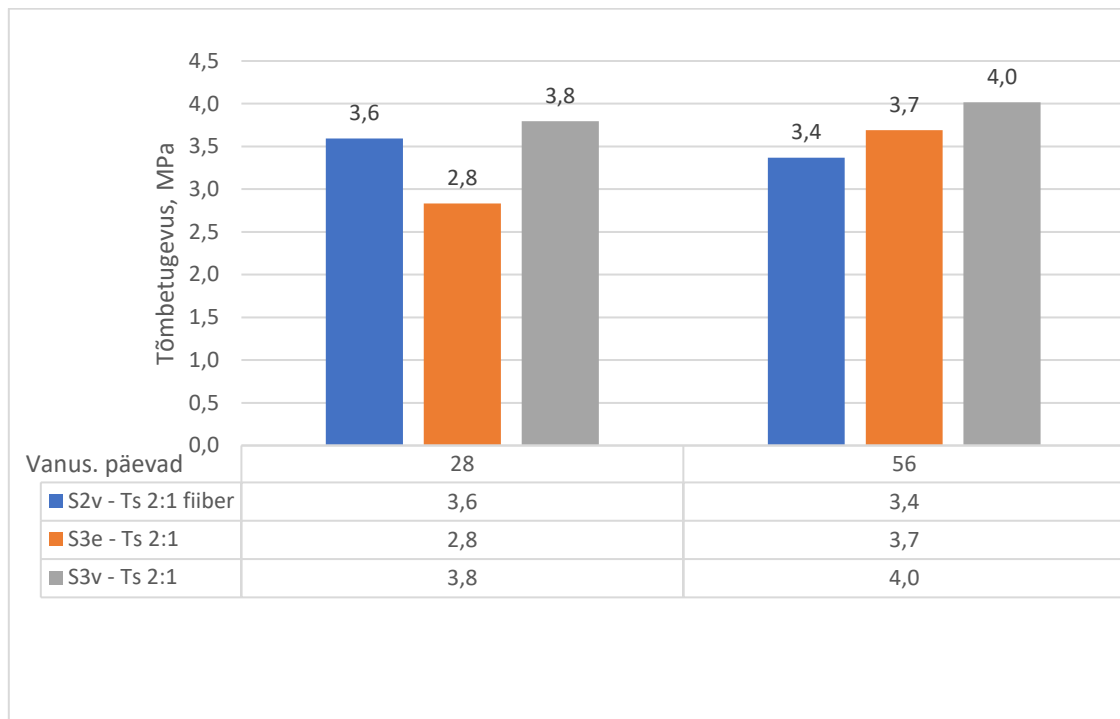
Joonis 3.3 Tsementsideainega 2:1 liiva suhtega betooni nakketugevus [31]

3.1.4 Tõmbetugevus

28 päeva vanusel seerial on madalama veekogusega retseptil kuni 36% kõrgem tõmbetugevus, kui teistel retseptidel. Fiibri lisamisega saavutati sellises vanuses katsekehadel 29% protsenti kõrgem tõmbetugevus, kui fiibrita segul. [31]

56 päeva vannustel katsekehade tõmbetugevuste tulemustest järeldub, et madalama veekogusega betoon omab kõrgeimat tõmbetugevus. Eelnimetatud segu tõmbetugevus tuli 8% kõrgem, kui rohkema veega reseptil ja 18% kõrgem kui fiibriga betoonil. Fiibrita retseptid antud seerias omasid kõrgemat tõmbetugevust, kui fiibriga retsept. Antud tulemuste põhjal järeldub, et fiibri lisamine tasub ära varajases betooni eas. Võrreldes 28 päevase seeriaga kasvas 56 päevases seerias enim lisaveega fiibrita betooni tõmbetugevus ja seda 32% võrra. Lisaveeta fiibrita betooni retsept suurenes vähem – 5% ja ainsana langes tõmbetugevus lisaveeta fiibrita betoonil, mis on tõenäoliselt tingitud

sellest, et betoon on heterogeense struktuuriga või leidus tõmbele töötavas ristlõikes rohkem õhumulle mis vähendasid töötavat ristlõiget. [31]



Joonis 3.4 tsementsideainega 2:1 liiva suhtega betooni tõmbetugevus [31]

3.2 Tsementsideainega 11:9 liiva suhtega betoon

Võrreldakse retsepte tähistusega S4v, S4e, S5e ja S5v. S4 seeria betoonidele on lisatud fiibrit ja S5 seeria betoonidele ei ole. Samuti on kõik retseptid tehtud CEM I 42,5N tsemendiga, v.a S5e betoon mis on tehtud CEM I 52,5N tsemendiga. Lisaks veel "v" indeksiga segud on tehtud väiksema veesisaldusega, "e" indeksiga segud on antud seerias suurema veesisaldusega.

3.2.1 Survetugevus

3 päevasel katseseerial CEM I 52,5N tsemendiga tehtud betoon omab kõrgeimat survetugevust – 30% kõrgem kui madalaima väärtusega fiibriga betoon. Lisaveeta fiibriga retseptiga saavutati 3% kõrgem survetugevus võrreldes lisaveeta fiibriga retsepti.

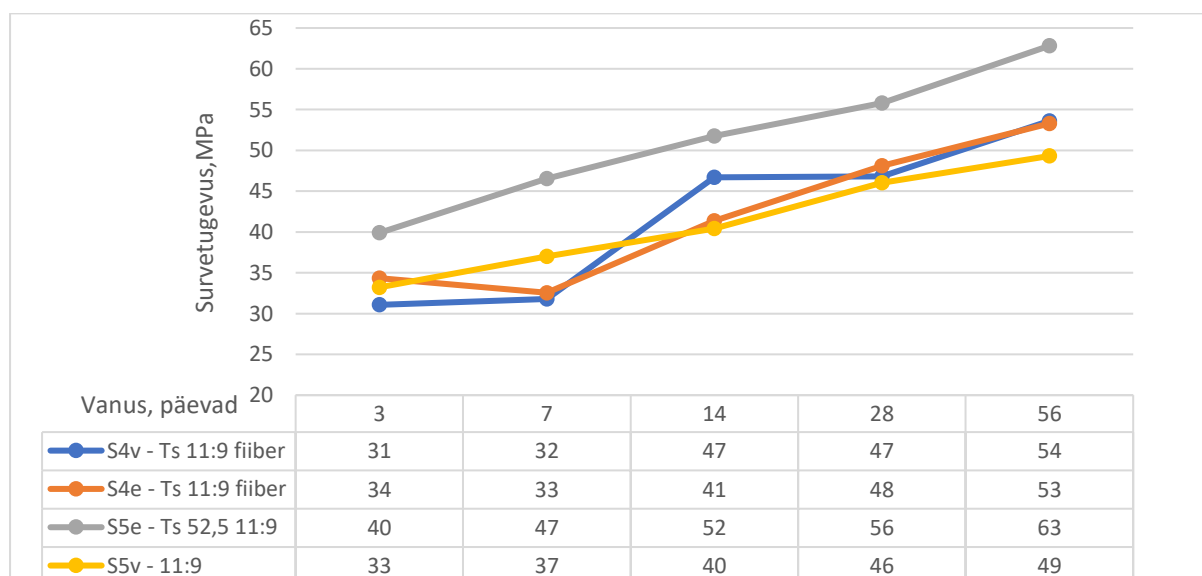
7 päeva vanustest katsekehades saadi kõrgeim survetugevus CEM I 52,5N tsemendiga retseptil – 47% kõrgem kui fiibriga ja lisaveeta retseptil. Lisaveeta fiibriga segul saadi 27% kõrgem survetugevus võrreldes lisaveega fiibriga segul. Võrreldes 3 päevase seeriaga kasva enim CEM I 52,5N tsemendiga survetuges ja 18% võrra, mis on tingitud sellest et

antud tsementsideainel on suurem eripind mis tähendab et on rohkem pinda veega reageerimiseks mistõttu toimub kivinemine kiiremini.

14 päeva vanusel katseseerial on lisaveetafiibrita betoonil 1 MPa võrra madalam survetugevus kui lisaveeta fiibriga retseptil. Võrreldes 7 päevase seeriaga suurenes enim lisaveeta fiibriga betooni survetugevus ja seda 47% võrra mis on tingitud sellest, et varasemas eas oli survetugevus väiksem tänu suuremale vesitsementtegurile. Tugevama tsemendiga betooni survetugevus suurenes 11% võrra.

28 päeva vanuste katsekehades seast nähtub, et kõrgeim survetugevus saadakse siiski parema tsemendiga ja eelnimetatud retsept andis 22% kõrgema survetugevuse, kui lisaveeta fiibrita segu ja 17% kõrgema kui lisaveega fiibriga segu. Samuti nähtub, et fiibriga saadi CEM I 42,5N tsementsideainete betoonide seast kõrgemad survetugevuse tulemused. Kivinemisperioodi seisukohalt ainsana ei kasvanud survetugevus fiibriga lisaveeta betoonil ja enim kasvas lisa ajaga lisaveega fiibriga betoon – 17%.

56 päeva katseseerial on kõrgeim survetugevuse CEM I 52,5N tsemendiga – 29% kõrgem kui lisaveeta fiibrita betoonil. 56 päevastel katsekehadel nähtub, et fiibriga saadakse kõrgemad tulemused, lisaveeta fiibriga segul tuli näiteks 10% kõrgem survetugevus kui lisaveeta fiibrita betoonil. Antud katseseeria puhul on näha, et survetugevust mõjutab tsemendi enda survetugevusklass ja fiibri lisamine ja suuremat mõju on märgata hilisemas betooni eas. Lineaarse kasvu andsid tugevama tsemendiga ja lisaveeta fiibrita betoon, fiibriga betoonidel oli kasvutempo mõnevõrra kõikumav, võib see olla tingitud sellest et fiibrita piirkonnas on jäänud tühimikke või pole vesi sideainele korrektselt ligi saanud ja setõttu oli fiibriga betoonidel survetugevuse kasv kõikumav.



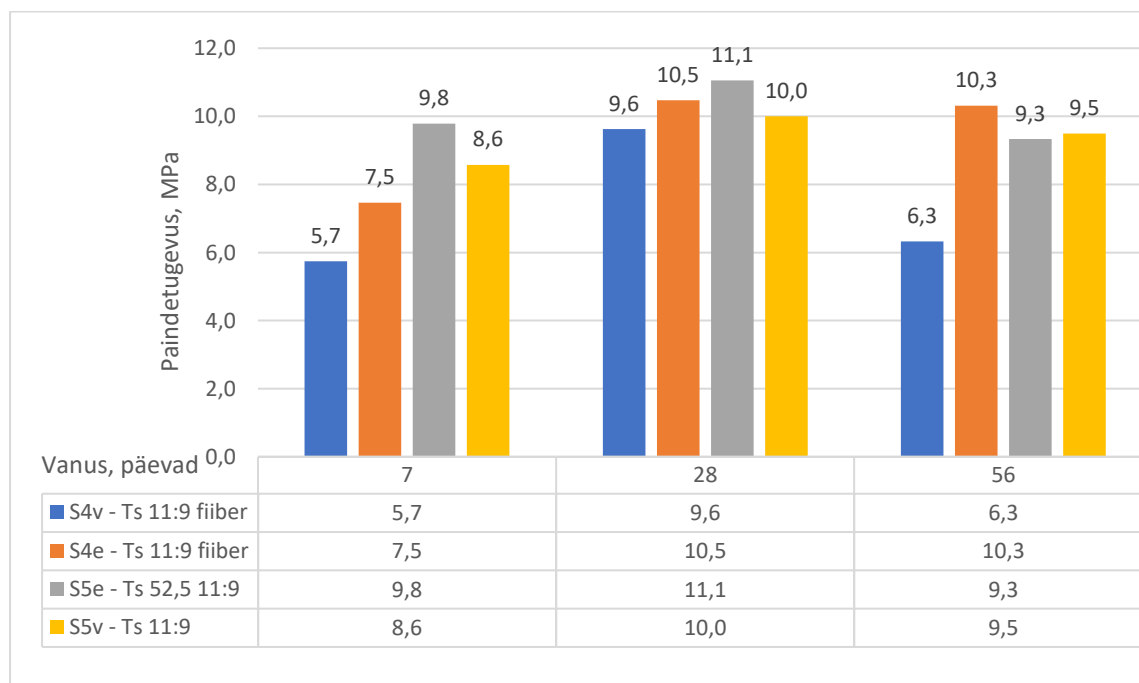
Joonis 3.5 Tsementsideainega 11:9 liiva suhtega betooni survetugevus

3.2.2 Paindetugevus

7 päeval seerial saavutas CEM I 52,5 N tsemendiga betoon 72% kõrgema paindetugevuse kui lisaveeta fiibriga betoon ja 30% kõrgema tulemuse kui lisaveega fiibriga retsept. Lisaveega fiibri retseptiga saadi 32% kõrgem tulemus võrreldus lisaveeta fiibriga seguga. Fiibriga betoonidest saadi 12% väiksem paindetugevus nõrgema tsemendiga tehtud betooni puhul.

28 päeval seerial on erinevused väiksemad. Tugevama tsemendiga betoonil saadi 16% kõrgem tugevus kui lisaveeta fiibriga betoonil ja 6% kõrgem tulemus kui lisaveega fiibriga retseptil. Fiibriga retseptides omandas lisaveega retsept 9% kõrgema paindetugevuse kui lisaveeta betoon. Fiibriga betoonides saadi suurem paindetugevus tugevama tsemendiga tehtud betoonis - 11% võrra suurem. Võrreldes 7 päevase seeriaga kasvas lisaperioodiga enim lisaveeta betooni paindetugevus - 68% võrra. Kõige vähem kasvas CEM I 52,5N tsemendiga betooni paindetugevus - 13% tingitud on see sellest, et varjases eas tänu suuremale tsemendi eripinnale oli rohkem pinda veega reageerimiseks ja varajase eaga saavutati antud betoonile maksimaalne paindetugevus, teoreetiliselt kasvab betooni tugevus lõpmatult kaua kuid proportsionaalselt aina vähem.

56 päeval katseseerial selgub, et lisanduva 28 päeva kivilinemisega paindetugevused ei ole kõrgemad. Tugevama tsemendiga retseptil on 10% madalam tulemus kui lisaveega fiibriga retseptil, kuid 48% kõrgem lisaveeta fiibriga retseptist. Järeldub et 28 päevaga saadakse maksimaalne paindetugevus kätte.



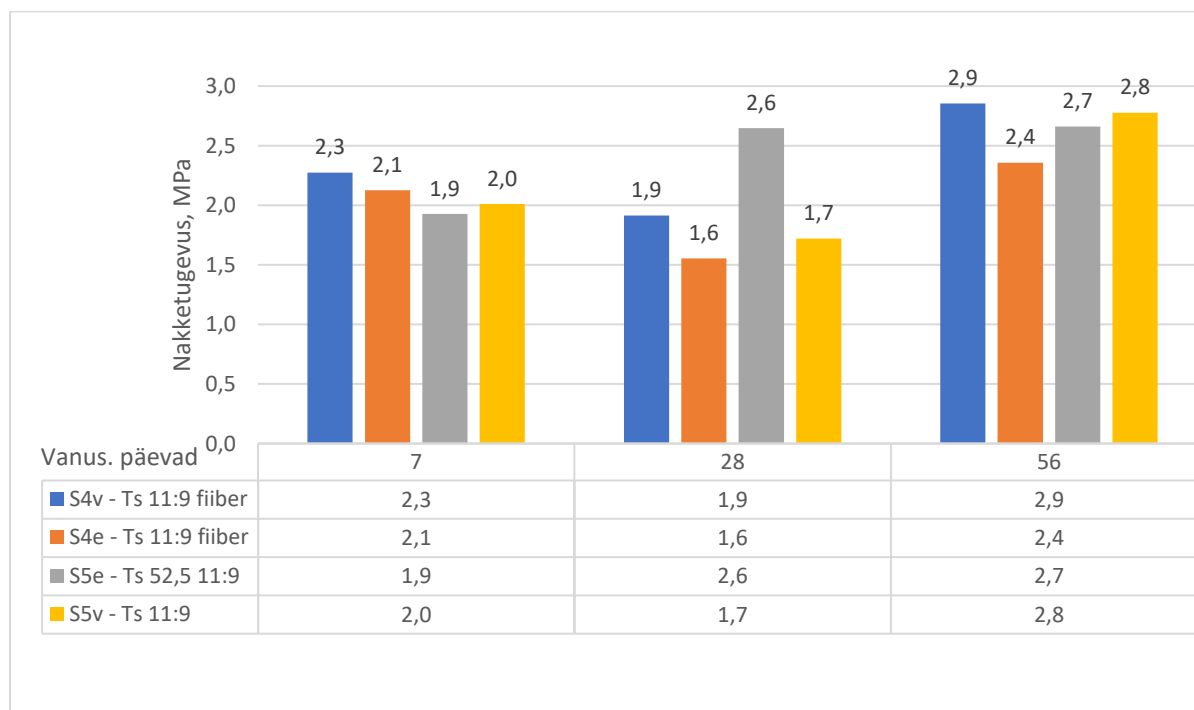
Joonis 3.6 Tsementsideainega 11:9 liiva suhtega betooni paindetugevus

3.2.3 Nakketugevus

7 päeval seerial nähtub, et betoonid kus on kasutatud fiibrit, omavad kõrgemat nakketugevust. Väiksema veesisaldusega fiibriga betooniga saadi 12% kõrgem nakketugevus, kui seda saadi kõrgema survetugevusklassiga fiibrita segul. Madalama veesisaldusega fiibrita betoonil saadi 5% kõrgem nakketugevus kui kõrgema klassi tsemendiga fiibrita betoonil.

28 päeva katseseerial saadi CEM I 52,5N tsemendiga tehtud betooniga 63% kõrgem nakketugevus, kui kõrgema veesisaldusega fiibriga segus. Lisaks veel madalama veekogusega fiibriga segu andis 12% kõrgema nakketugevuse kui madalama veekogusega fiibrita segu.

56 päeva seerial on kõrgeima nakketugevusega madalama veekogusega fiibriga betoon. Eelnimetatud betooniga saadi 21% kõrgem nakketugevus kui kõrgema veekogusega fiibriga betooniga. Fiibrita seerial saadi väiksema veekogusega madalama survetugevusklassiga tsemendiga 4% kõrgem nakketugevus, kui kõrgema survetugevusklassi tsemendiga tehtud betoonil.



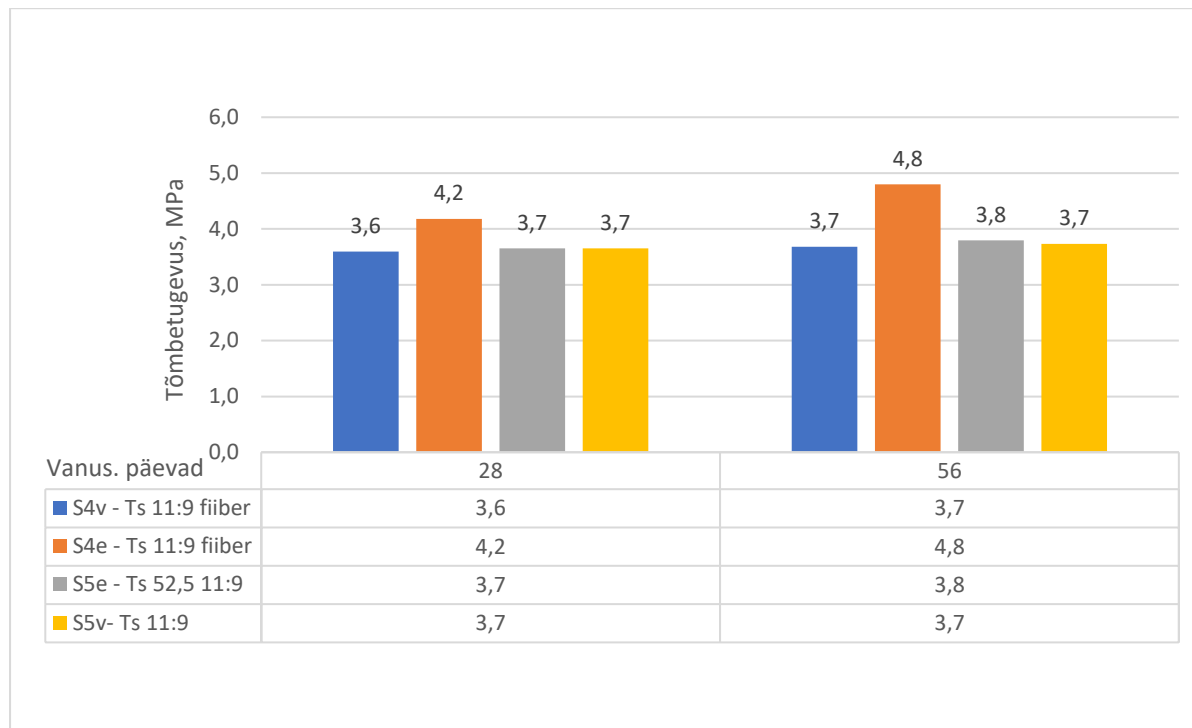
Joonis 3.7 Tsementsideainega 11:9 liiva suhtega betooni nakketugevus

3.2.4 Tõmbetugevus

28 päeva katseseerial saadi kõrgeim tõmbetugevus fiibriga suurema veekogusega betooniga – 14% kõrgem CEM I 52,5N tsemendiga tehtud betoonist. Fiibrita betoonide

seerias olid tõmbetugevused samad, kuigi ühes betoonis kasutati madalama survetugevusklassiga tsementi.

56 päeva vanustel katsekehadel on tõmbetugevuste erinevus suurem. Suurema veekogusega fiibriga betoon andis 30% kõrgema tõmbetugevuse, kui väiksema veesisaldusega fiibriga betoon. Teistel betoonidel saadi sama kõrged tõmbetugevused. Võrreldes 28 päevase katseseeriaga nähtub, et täiendav 28 päeva kivistumist ei suurenda tõmbetugevust suurel määral, vaid kasv jääb minimaalseks.



Joonis 3.8 Tsementsideainega 11:9 liiva suhtega betooni tõmbetugevus

3.3 Tuhksideainega 2:1 liiva suhtega betoon

Võrreldakse põletatud põlevkivi ja 2:1 liiva suhtega betoone, ainus retsept kus on kasutatud fiibrit on tähistusega "S6v" ja ülejäänud retseptid on tähistusega "S6e" ning "S7e2". Lisaks veel "v" indeksiga segud on tehtud väiksema veesisaldusega, "e" indeksiga segud on antud seerias suurema veesisaldusega. [31]

3.3.1 Survetugevus

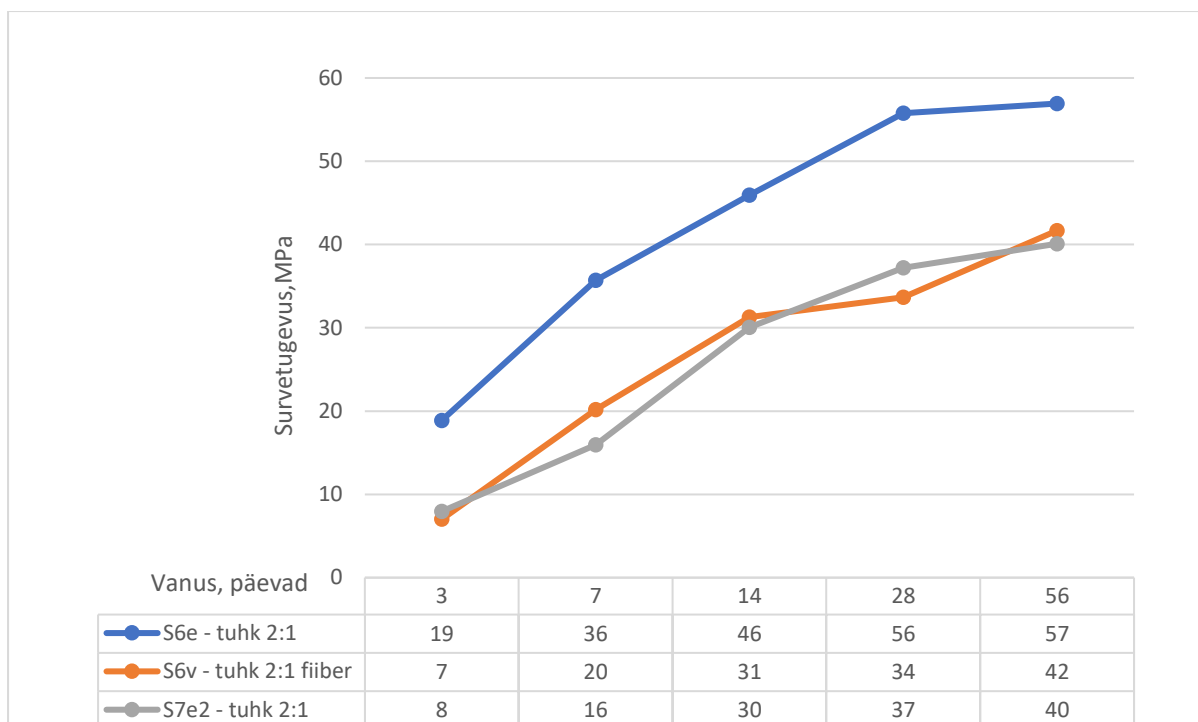
3 päevases katseseerias saadi kõrgeim survetugevus väikseima veesisaldusega betoonis. Väiksema veesisalduse fiibriga betooniga saadi 171% kõrgem survetugevus, kui seda suurema veesisaldusega fiibriga betoonis. Kõrgema veesisaldusega segudest saadi fiibriga seguga 14% kõrgem survetugevus. [31]

7 päeva vanuses katseseerias saavutas fiibrita madala veesisaldusega betoon 125% kõrgema survetugevuse, kui kõrgema veesisaldusega fiibrita segu. Suurema veesisaldusega fiibriga retsept saavutas 25% kõrgema survetugevuse kui väiksema veesisaldusega betoon. Võttes võrdlusesse 3 päevase seeria survetugevuse tulemused, nähtub, et enim kasvas lisaveeta fiibriga betooni survetugevus ja 2,9 korda suuremaks täiendava 4 päevase kivistumisega teistel betoonidel jääb kasv aga 2 kordseks. [31]

14 päeval katseseerial on suuremate veesisaldustega retseptidel pea sama suured survetugevused, kui kõige kõrgema survetugevuse andis väikseima veesisaldusega betoon – 53% suurem kui suurema veesisaldusega fiibriga segul. Vaadeldes eelmist katseseeriat, nähtub et kõige rohkem kasvas lisaveega fiibrita betooni survetugevus – 88% tingitud on see sellest, et antud betoonil oli suurem vesitsementtegur mistõttu varasemas eas oli väiksemad tugevused ja kasv kiirenes hiljem. Samas lisaveeta fiibrita betoonil andis lisaperiood 28% täiendavalt survetugevust juurde ja lisaveeta fiibriga betoon 55%. [31]

28 päeval seerial on kõige enam kasvatanud survetugevust madala veesisaldusega segu. Suurema veesisaldusega segude survetugevused niivõrd palju ei erine, fiibrita seguga saadi 9% kõrgem survetugevus kui fiibriga segul. Täiendava kiviniemiseperioodiga võrreldes eelmist katseseeriat kasvas lisaveeta fiibrita betooni survetugevus 10%, lisaveega fiibrita betoonil 23% ja lisaveeta fiibrita betoonil 22%. Antud tulemused viitavad, et fiibrita lisaveega betoonil toimub kiirema tempoga kasv. [31]

56 päeval seerial on suurema veesisaldusega betoonide survetugevus endiselt sama suured. Kõige väiksema veesisaldusega betoon on endisel kõige suurema survetugevusega – 40% kõrgem kui suurema veesisaldusega fiibrita segu. Samuti on väiksema veesisaldusega betoonidest fiibriga betoonil suurem survetugevus kui fiibrita retseptil. Täiendav perioodiga kasvas kõige vähem lisaveeta fiibrita betooni survetugevus – 2% mis viitab sellele, et lühikese perspektiivi kohta saavutati maksimaalne survetugevus 28 päevaga. Küll aga varasemast aeglasema kasvutempoga lisaveeta fiibriga tugevuse kasv kiirenes ja võrreldes eelmist seeriat andis antud betoon 24% survetugevuse kasvu. Lisaveega fiibrita betoon andis 8% kasvu võrreldes eelmise perioodiga, jäädes samaaegselt kõige väiksema survetugevusega betooniks kuna antud betoonis oli rohkem vett kui teistes. [31]



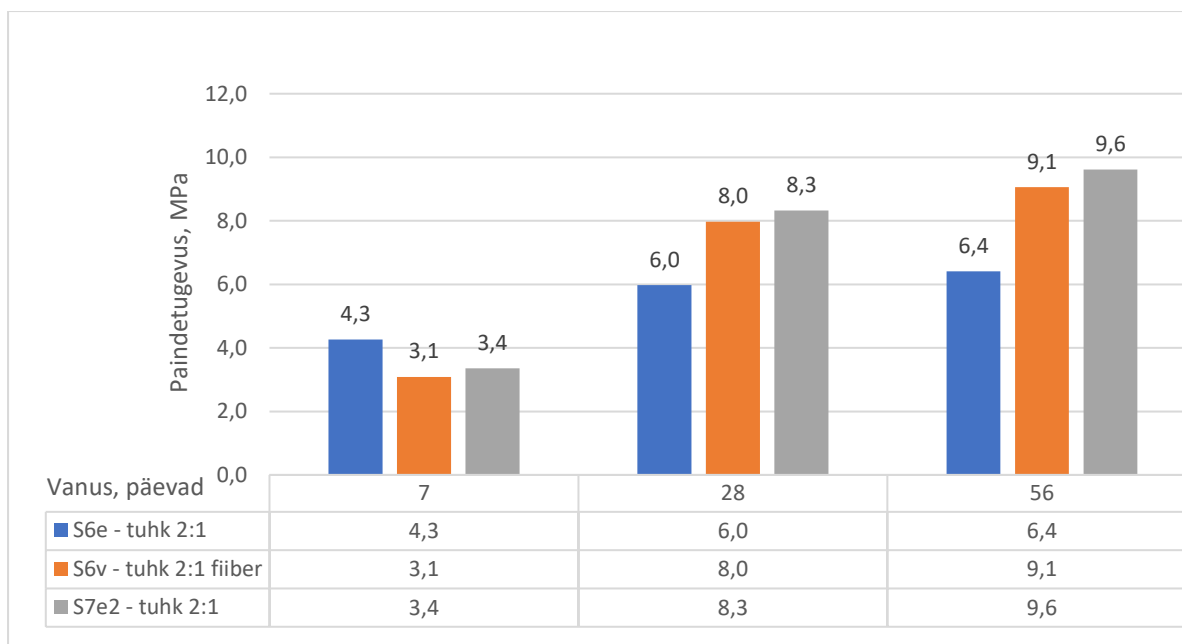
Joonis 3.9 Tuhksideainega 2:1 liiva suhtega betooni survetugevus [31]

3.3.2 Painedugevus

7 päevases seerias on tugevaim retsep madalama veesisaldusega fiibriga betoon – 39% suurema painedugevusega kui suurema veesisaldusega fiibriga betoon. [31]

28 päeva vanustel katsekehadel on fiibriga suurema veesisaldusega retseptil 38% suurem painedugevus võrreldes väiksema veesisaldusega fiibriga seguga. Hilisemas eas on näha, et siiski suurema veesisaldusega betoonid on tugevamad ja tingitud on sellest, kuna väiksema veesisaldusega tuli suurte poorsustega betoon, tänu millele tööle hakkav tõmbetooni ristlõige on väiksem. Kahel retseptil on näha üle 100% painedugevuse kasvu, ainsana lisaveeta fiibriga betoon ei kasvatanud sellise tempoga tugevust. [31]

56 päeva vanuste kehade seas on näha suuremat painedugevuse kasvu suurema veesisaldusega retseptides. Võrreldes suurema veesisaldusega fiibriga betooni väiksema veesisaldusega fiibriga betooni – saadi 50% suurem painedugevus. Samuti esimesena nimetatud retseptil tuli 5% kõrgem painedugevus kui fiibriga segul. [31]



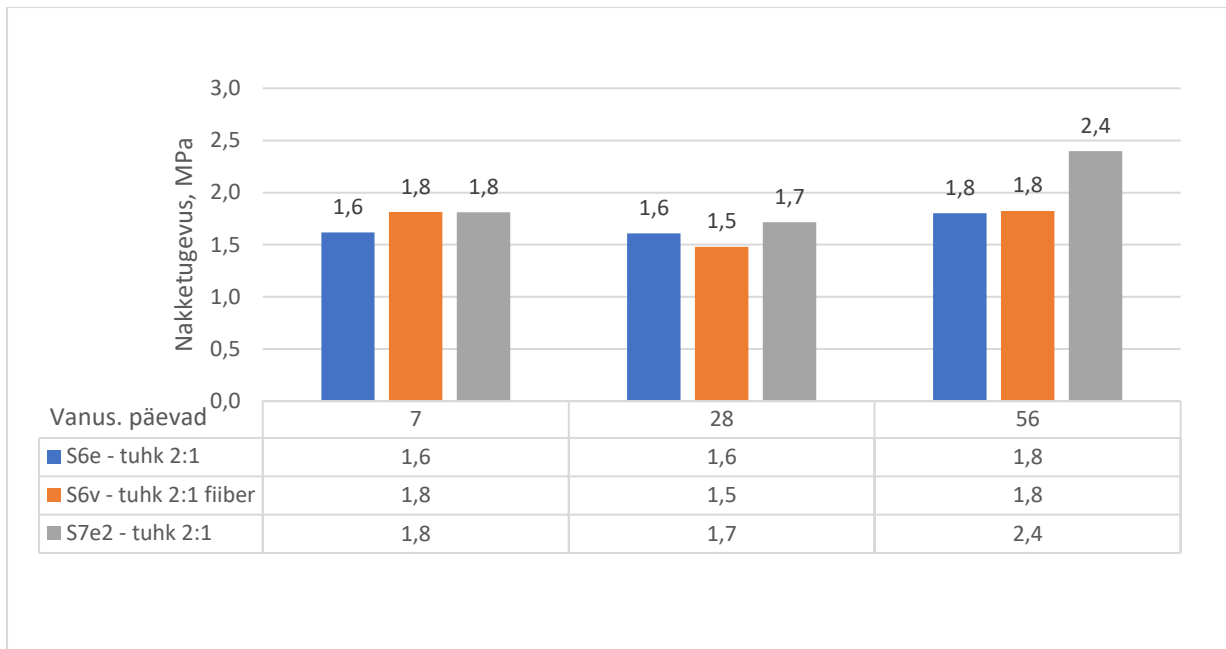
Joonis 3.10 Tuhksideainega 2:1 liiva suhtega betooni paindetugevus [31]

3.3.3 Nakketugevus

7 päevases seerias saadi sama suured nakketugevused nii suurema veesisaldusega fiibrita segus, kui ka suurema veesisaldusega fiibriga segus. Mõlema betooni tulemus oli suurem 13% väiksema veesisaldusega fiibrita betoonist. [31]

28 päeva vanustel katsekehadel on erinevusi rohkem. Kõige suurem nakketugevus saavutati suurema veesisaldusega fiibrita betoonis – 13% kõrgem kui suurema veesisaldusega fiibriga betoonis. Kõigi kolme võrdluses oleva retsepti seast saadi aga madalaim tulemus betooniga milles oli fiibrit. [31]

56 vanuste katsekehade seas olid väiksema veesisaldusega fiibrita betooni ja suurema veesisaldusega fiibriga betooni nakketugevused sama suured. Kõige tugevam nakketugevus saavutati suurema veesisaldusega fiibrita segus – 33% tugevam nake kui kahel teisel retseptil. [31]

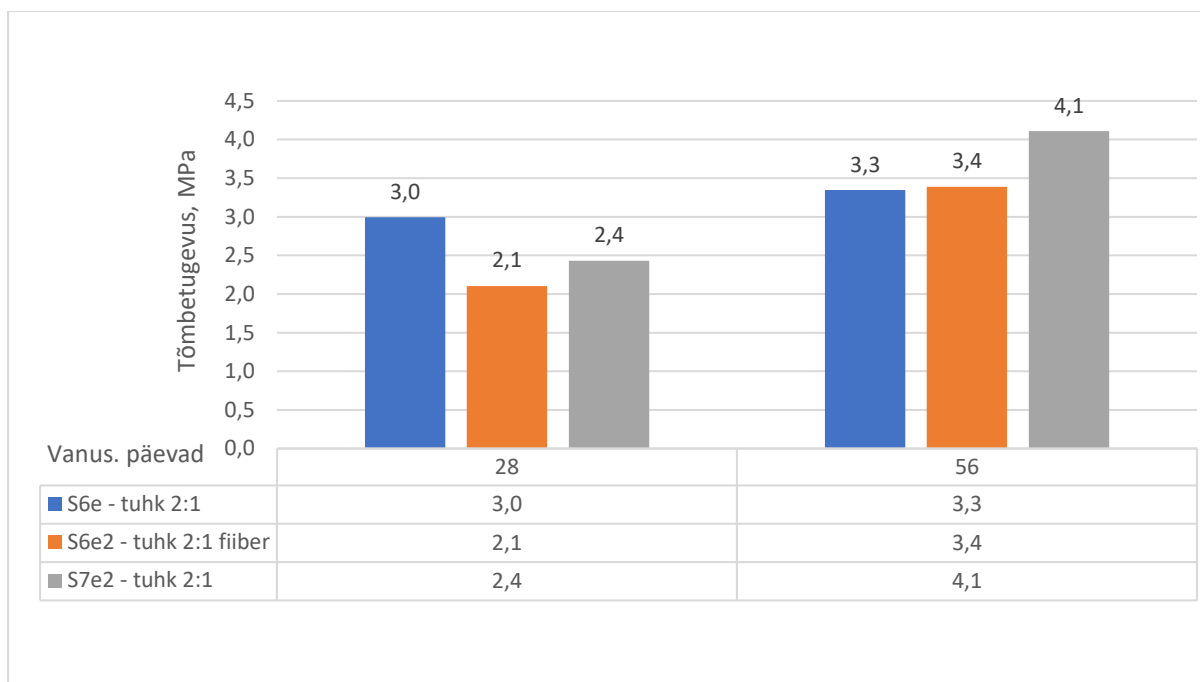


Joonis 3.11 Tuhksideainega 2:1 liiva suhtega betooni nakketugevus [31]

3.3.4 Tõmbetugevus

28 päeva vanustel katsekehadel on nähtub, et kõrgeim tõmbetugevus saavutati madala veesisaldusega ja 43% kõrgem kui fiibriga kõrgema veesisaldusega betoon. Kõrgema veesisaldusega retseptidest saavutas fiibrita betoon 14% kõrgema tõmbetugevuse kui fiibriga betoon. [31]

56 päeval seerial omandas kõrgeima tõmbetugevuse fiibrita suurema veesisaldusega betoon – 21% suurem kui kõrgema veesisaldusega fiibriga betoon. Samas fiibriga kõrgema veesisaldusega betoon andis 3% suurema tõmbetugevuse kui väiksema veesisaldusega fiibrita betoon. Samuti nähtub, et suurema veekogustega retseptid kasvatasid enim tõmbetugevust lisa 28 päevase kivilnemisega. [31]



Joonis 3.12 Tuhksideainega 2:1 liiva suhtega betooni tõmbetugevus [31]

3.4 Tuhksideainega 11:9 liiva suhtega betoon

Võrreldakse retsepte S8e2, S8v, S9e2 ja S9v. Indeksiga "v" ehk vajumisegud on tehtud väiksema veekogusega ja indeksiga "e" on tehtud suurema ehk etalonsegu järgi fikseeritud veekogusega. S8e2 ja S8v tähisega betoonid on tehtud fiibriga ja ülejäänud 2 fiibrita. [31]

3.4.1 Survetugevus

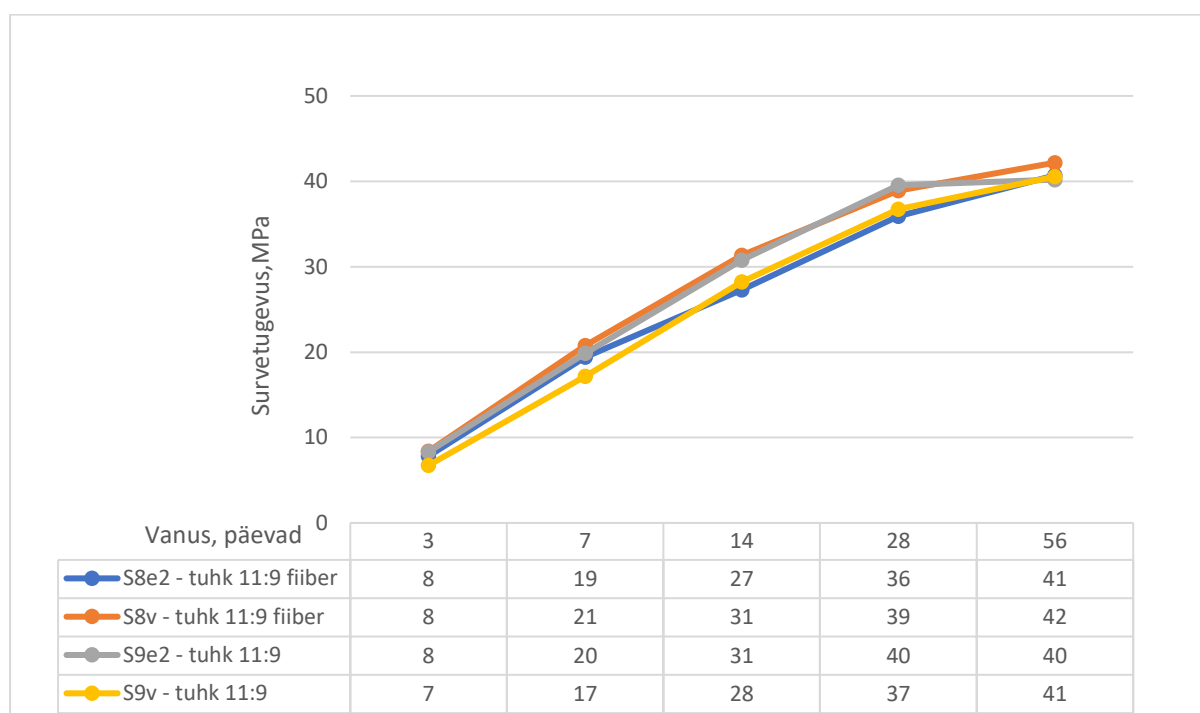
3 päevases seerias on kõigil retseptil pea sama suur survetugevus välja arvatud betoon mis on fiibriga ja väiksema veekogusega – 13% väiksem survetugevus teistest.

7 päeva vanuste katsekehade katsetamistel saadi kõrgeim survetugevus lisaveeta fiibriga betooni – 24% kõrgem kui seda saadi lisaveeta fiibrita betooniga. Samuti lisaveega fiibrita betoon andis 5% kõrgema survetugevuse kui lisaveega fiibriga betoon.

14 päeval seerial saadi madalama veesisaldusega fiibriga ja suurema veesisaldusega fiibrita betoonidel võrdsed survetugevused, mis on ka antud seerias suurimad. Lisaveeta fiibrita betooniga saadi 4% kõrgem survetugevus võrreldes lisaveega fiibriga betooni. Üldiselt on kõigil retseptidel sama kiire survetugevuse kasv, küll aga kasvas lisaveeta fiibrita betooni survetugevus kõige aeglasemalt.

28 päeva vanuste katsekehade seerias andis suurima survetugevuse lisaveeta fiibriga betoon – 11% kõrgem kui lisaveega fiibriga betoon. Lisaveeta fiibriga betoon andis 8% kõrgema survetugevuse kui lisaveega fiibriga betoon. Eelnevalt kõige aeglasema survetugevuse kasvu tempoga lisaveeta fiibriga betooni tugevuse kasvu tempo kiirenes ja võrreldes eelneva perioodiga suurenes survetugevus 32% võrra, küll aga kõige kiiremini suurenes lisaveega fiibriga betooni survetugevus ja seda 33%. Teistel retseptidel sellist survetugevuse kasvutempot ei olnud.

56 päeva vanuste katsekehade seast andsid lisaveega fiibriga ja lisaveeta fiibriga retseptid samaväärsed survetugevus, kõrgeim saadi lisaveeta fiibriga betooniga. Samuti lisaveega fiibriga betooni survetugevus täiendava 28 päeva kivinemisega ei kasvanud. Enim kasvatas survetugevus selle perioodiga lisaveega fiibriga betoon – täiendavalt 14%. Võrreldes eelmise perioodiga kasvas nende betoonide survetugevus kõige kiiremini mis olid eelnevalt teistest maha jäänud, kuid 56 päevases seerias on kõigil betoonidel survetugevus peaaegu sama suured.



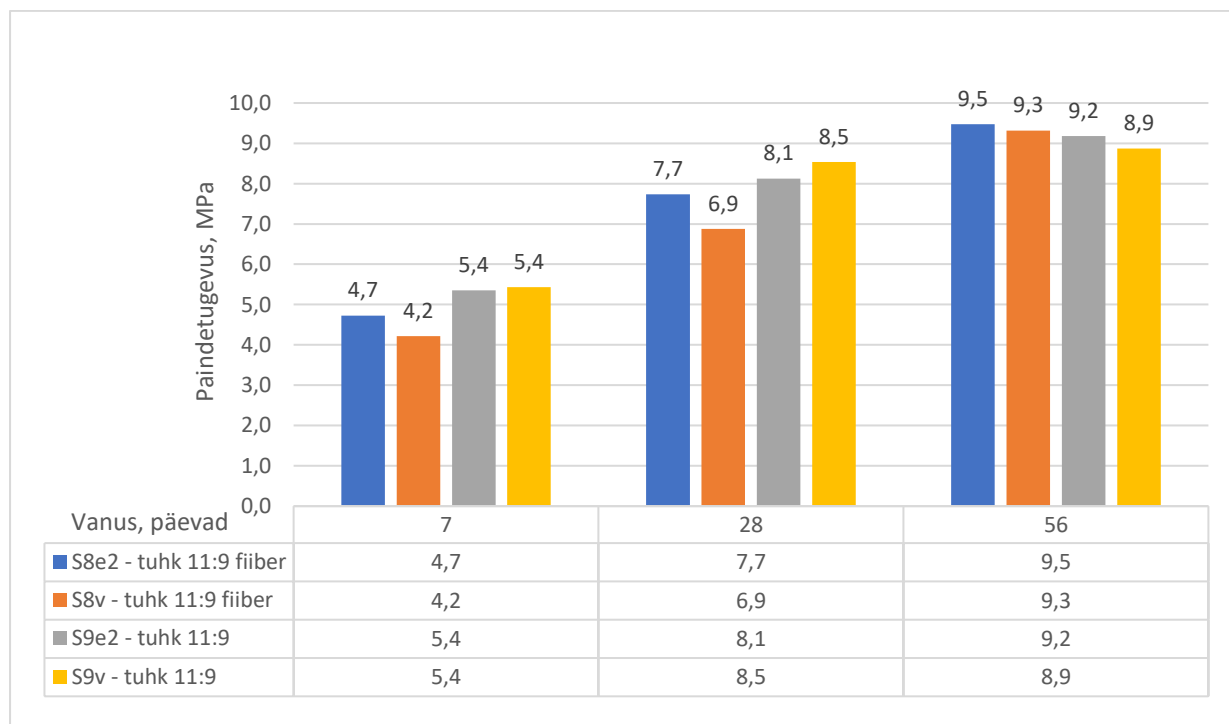
Joonis 3.13 Tuhksideainega 11:9 liiva suhtega betooni survetugevus

3.4.2 Painedugevus

7 päevasel seerial saadi võrdsed ja ühtlasi ka kõrgeimad painedugevused lisaveega ja lisaveeta fiibriga betoonidel, omades 29% kõrgemat painedugevust kui lisaveeta fiibriga betoon. Samuti saavutas lisaveega fiibriga retsept 12% kõrgema painedugevuse, kui lisaveeta fiibriga betoon.

28 päevasel seerial andis lisaveeta fiibrita betoon 23% kõrgema paindetugevuse kui lisaveeta fiibriga betoon. Suurima paindetugevuse saadi ühtlasi lisaveeta fiibrita betooniga. Võrreldes fiibriga retsepte andis lisaveega betoon 12% kõrgema paindetugevuse. Kõik retspetid andsid täiendava kivinemise perioodiga minimaalselt 50% täiendava paindetugevuse kasvu. Kõige kiiremini kasvas lisaveeta fiibriga betooni survetugevus – 64%.

56 päevasel seerial nähtub, et suurima paindetugevuse kasvu andis lisaveeta fiibriga betoon - 7% suurem kui lisaveeta fiibrita retsept, mis eelnevatel seerialtel omandas suurima paindetugevuse. Küll aga suurima paindetugevusega lisaveega fiibriga retsept andis 2% kõrgema paindetugevuse kui lisaveeta fiibria betoon. Järeldub, et fiibriga saavutatakse kõrgem paindetugevus hilisemas betooni eas. Ühtlasi kõige kiirema kasvutempod andsid fiibriga betoonid lisaveega vastavalt 23% ja lisaveeta 35%. Ülejäänud kahel retseptil kasvas selle perioodiga lisaveega retseptil ja lisaveeta retseptil vastavalt 5% ja 13%. Sellise kasvutempo põhjal võib järeldada et täiendava kuu või kahe jooksul võib oodata sellist tugevuse kasvu veel, kuid selleks tuleks teha veel katseid et saaks teha lõplike järeldusi.



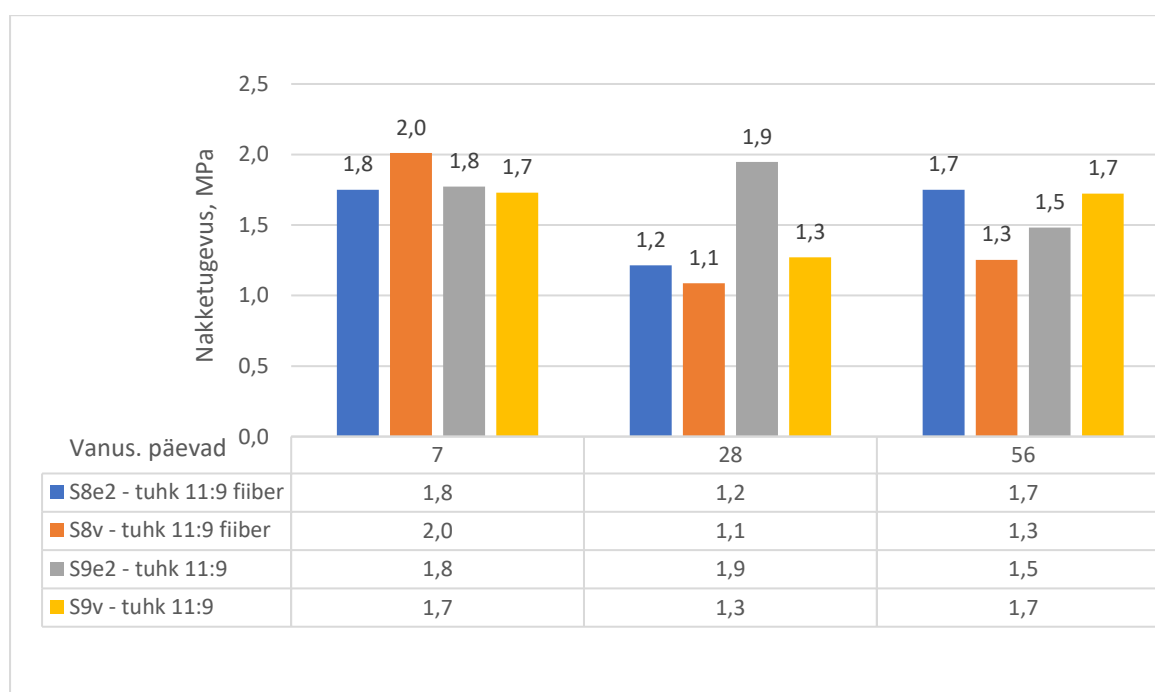
Joonis 3.14 Tuhksideainega 11:9 liiva suhtega betooni paindetugevus

3.4.3 Nakketugevus

7 päeva vanustest betoonidest andis suurima nakketugevuse lisaveeta fiibriga betoon – 18% suurem kui lisaveeta fiibrita betoon. Lisaveega fiibriga ja lisaveeta fiibrita betoonid saavutasid samaväärsed nakketugevused.

28 päevases seerias saavutas suurima nakketugevuse lisaveega fiibrita betoon ja 58% suurem võrreldes lisaveega fiibri betooniga. Lisaveeta retseptidest saadi suurem nakketugevus fiibrita betooniga – 18% suurem võrreldes betooniga mis oli tehtud fiibriga.

56 päevases seerias saadi lisaveega fiibri betooniga ja lisaveeta fiibrita betooniga samaväärsed tulemused. Lisaveega fiibrita betoon andis 15% kõrgema nakketugevuse, kui lisaveeta fiibriga betoon.

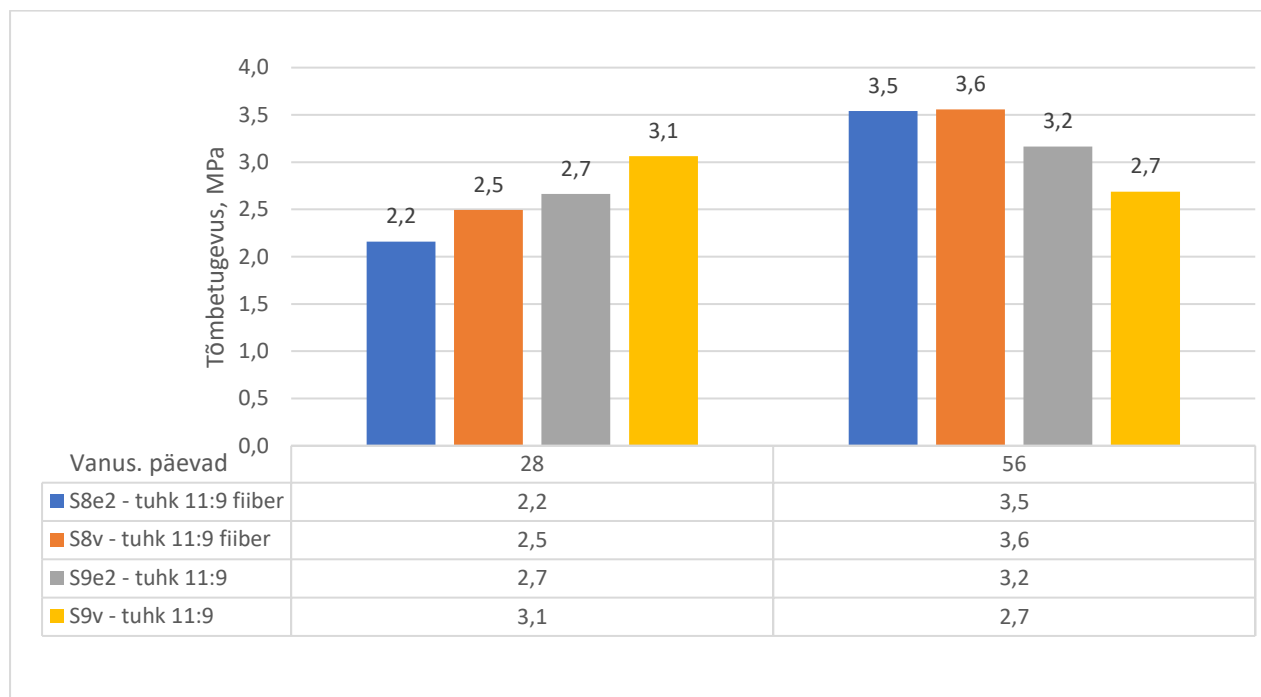


Joonis 3.15 Tuhksideainega 11:9 liiva suhtega betooni nakketugevus

3.4.4 Tõmbetugevus

28 päeva vanuses seerias saadi kõrgeim tõmbetugevus lisaveeta fiibrita betooniga – 41% suurem võrreldes lisavee ja fiibri betooniga. Lisaveeta fiibriga betooniga saadi 14% kõrgem tõmbetugevus, kui lisaveega fiibri betooniga. Samuti saadi lisaveeta fiibrita betooniga 15% suurem tõmbetugevus, kui lisaveega fiibrita betooniga. Võib järeldada, et peale 28 päeva kivinemist võtab fiiber täiendavat tõmbepinget vastu, omistades seeläbi betoonile suurema tõmbetugevuse ja samuti väiksem veekogus aitab kõrgemat tõmbetugevust saavutada.

56 päevases katseseerias andsid suurimad tõmbetugevused lisaveega ja lisaveeta fiibriga betoonid. Lisaveeta fiibriga betoon andis 33% suurema tõmbetugevuse kui lisaveeta fiibriga betoon. Lisaveega fiibriga betooni retsept andis 9% suurema tõmbetugevuse kui lisaveega fiibriga betoon. Saab järeldada, et hilisemas eas tuhksideainega fiibriga betoon annab suuremaid tõmbetugevusi.



Joonis 3.16 Tuhksideainega 11:9 liiva suhtega betooni tõmbetugevus

3.5 Tuhk- ja tsementsideaine 11:9 liiva suhtega betoonide survetugevuse kasvutempo võrdlus

3.5.1 Fiibriga betoonide võrdlus

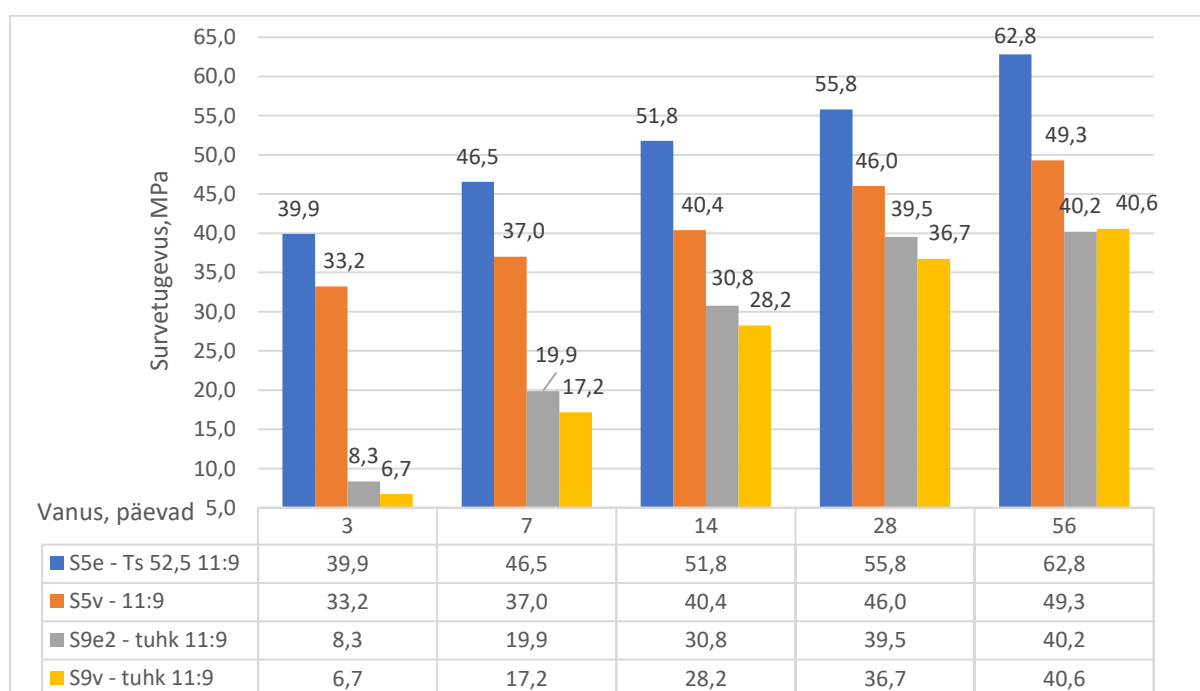
3 päevases seerias joonistub selge erinevus tuhk- ja tsementsideainega tehtud betoonide survetugevuse suuruses. Tsementsideainega tehtud betoonide survetugevused on vähemalt 370% kõrgemad tuhksideainega betoonidest. Varajases eas jääb tuhabetooni survetugevuse kasv võrreldes tsementsideaine betooniga minimaalseks.

7 päevases katsekehade seerias on survetugevuste erinevus väiksem, tsemendiga tehtud betoonide survetugevused on vähemalt 85% suuremad kui tuhksideainega tehtud betoonidel. Küll aga on näha, et survetugevuse kasvutempo on oluliselt kiirenenud hilisemas eas tuhksideainel, vähemalt kahekordseks on kasvanud survetugevused tuhabetoonidel, kuid tsemendibetoonidel on tempo aeglasem.

14 päevases seerias on tsemendiga tehtud betoonide survetugevused vähemalt 29% suuremad, kui tuhksideainega tehtud betoonidel, kuid mitte rohkem kui 85%. Nähtub, et tsemendibetoonide survetugevuse kasvud on suuremal määral aeglustunud võrreldes tuhabetoonidega. Tuhksideainega lisaveega betoon saavutas 14 päevaga 56-päevasest survetugevusest 78% ja lisaveeta retsept 76%. CEM I 52,5N tsemendiga tehtud betoon saavutas 83% 56-päevasest survetugevust ja CEM I 42,5N tsemendiga tehtud betoon saavutas 82% 56-päevasest survetugevusest.

28 päevases seerias on tsementsideainega betoonid vähemalt 15% suurema survetugevusega, kuid mitte rohkem kui 51% võrreldes tuhabetoonidega. Vaadeldes kasvutemposid siis kõige kiiremad tugevuse kasvud saavutati tuhabetoonidega. Antud seerias ja eelmises on tuhabetoonidel saavutatud arvestatavad survetugevused, mis on sobilikud ka praktiliseks ehituseks, kuid vastutusrikkamate konstruktsioonide jaoks tuleb töötada välja täpsemad arvutusmeetodid, kuna tuha omadused on teistsugusemad võrreldes tsemendiga.

56 päeva seeriat analüüsid järeldub, et tsementsideainega betooni survetugevuse kasv jätkub samas tempos, kõige kiirema retsepti kasvutempo oli täiendav 13% survetugevuse kasv, kuid samas tuhabetooni kõige kiirem tempo oli 11%. Järeldub, et 28 päevaga saavutatakse tuhabetooniga kõige suurem survetugevuse kasv ja sellest edasi ei ole praktilises ehituses kasulik oodata edasist kasvu, kuid joonistub, et tuhksideainega betoonid kivinevad kauem aega ja varasemas kivinemisperioodis tuleb kauem oodata.



Joonis 3.17 Tuhk- ja tsementsideainega 11:9 liiva suhtega fiibrita betoonide survetugevused

3.5.2 Fiibriga betoonide võrdlus

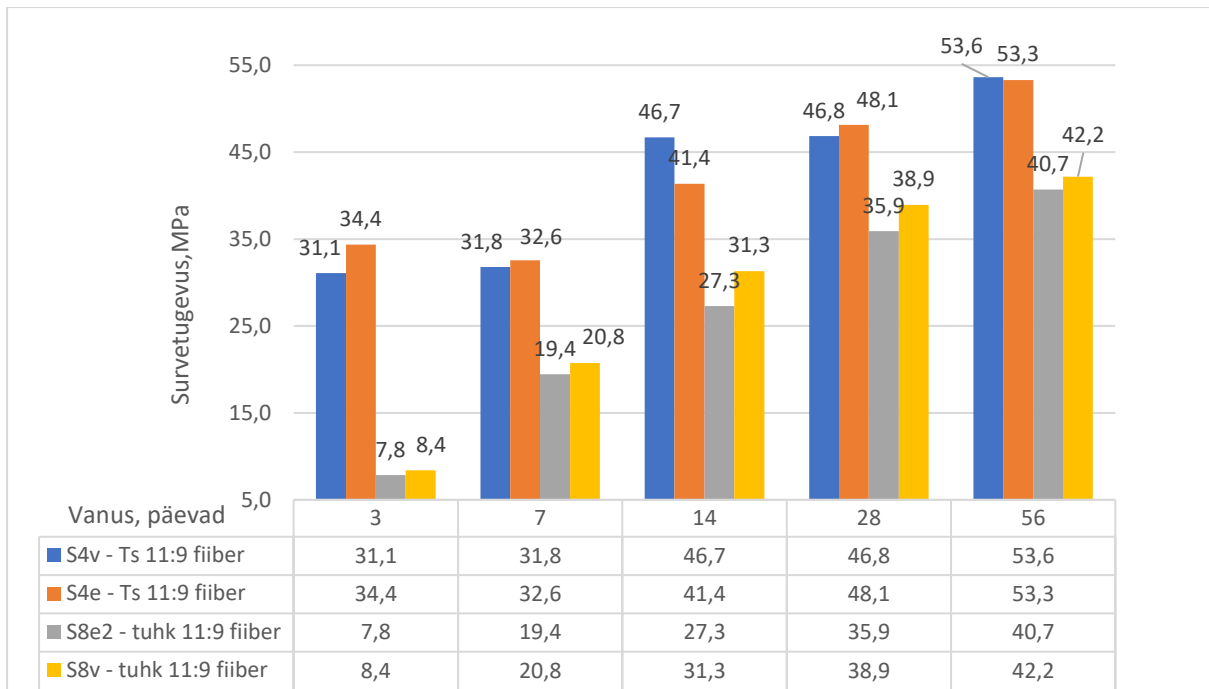
3 päevases seerias on samasugune olukord nagu fiibrita betoonidel oli, tuhabetoonide survetugevused on varajases eas kordades madalamad, tsemendiga tehtud betoonide survetugevused on vähemalt 288% kõrgemad tuhabetoonidest.

7 päevases seerias on fiibriga tuhabetoonide survetugevused üle poole tsemendiga tehtud betoonidest. Tsemendiga tehtud betoonide survetugevuste kasvud võrreldes eelneva perioodiga ei ületa 3%. Tuhaga tehtud betoonide survetugevused kasvasid lisaveega retseptil ja lisaveeta retseptil vastavalt 138% ja 163%.

14 päeva vanuste katsekehadel on näha, et tsementsideainega tehtud betoonidel survetugevuse kasv on lisaveeta retseptil 47% ja lisaveega retseptil 24%. Tuhabetoonide survetugevused kasvasid lisaveega retseptil 42% ja lisaveeta retseptil 48%. Nähtub, et tuhabetoonide kasvutempo on mõnevõrra parem ja erinevus joonistub välja lisaveega retseptidel, kus kasvutempo erines 18 protsendipunkti.

28 päeva vanuses retseptide seerias on tsemendiga lisaveeta ja lisaveega tehtud betoonidel kasvuprotsent võrreldes 14 päevase seeriaga vastavalt 0% ja 17%. Samas tuhabetoonidel lisaveeta ja lisaveega vastavalt 26% ja 33%.

56 päevases seerias võrreldes 28 päevase seeriaga on tsemendiga lisaveeta ja lisaveega retseptidel survetugevus kasvanud vastavalt 15% ja 10%. Samas tuhabetoonidel lisaveeta ja lisaveega 8% ja 14%. Nähtub, et tuhaga tehtud betoonidel läheb kauem aega lõpliku survetugevuse saavutamiseks ja kasvutempo on suurem tuhaga tehtud betoonidest, kuid aina aeglustub. Kiirem kasvutempo tuhabetoonidel on tingitud sellest, et varasemas eas on tugevus väiksem. Samuti 56 päeva vanuselt on lisaveeta ja lisaveega tsemendiga tehtud betoon 29% tugevam, kui tuhaga lisaveeta ja lisaveega betoon.



Joonis 3.18 Tuhk- ja tsementsideainega 11:9 liiva suhtega fiibriga betoonide survetugevused

KOKKUVÕTE

Lõputöös uuriti tsement- ja tuhksideaine kasutamist peeneteralises betooni, samuti kus lisanditeks olid superplastifikaator ja polüpropüleenfiiber ning erinevate liivafraktsioonide osakaalude mõju segudele.

- 1) Põletatud põlevkivi tehtud retseptidel suurenes segu veevajadus. Näiteks võrreldes retsepte S8v (tuhksideainega) ja S3v (tsementsideainega) suurenes tuhksideainega retseptil veevajadus 27% , et saavutada samaväärne vajum raputuslaual.
- 2) Põletatud põlevkiviga tehtud retseptidel oli survetugevuse varjane kasv vähemalt 3 korda aeglasem kui tsementsideainega tehtud retseptidel. Näiteks võrreldes fiibrita betoone, saadi vähemalt 370% suurem survetugevus tuhksideainega betoonidel võrreldes põletatud põlevkivi retseptiga.
- 3) Survetugevuse kasvutempo on põletatud põlevkiviga tehtud retseptidel kiirem kui tsementsideainega tehtud retseptidel kuni 28 päeva vanuseni, mis on tingitud tuhksideainega retseptide madalast varajasest survetugevusest. Üldjuhul põletatud põlevkiviga tehtud retseptidel oli kasvutempo vähemalt 10% kiirem võrreldes tsementsideainega retsepte.
- 4) Värskest kokku segatud põletatud põlevkivi retseptid olid töödeldavuse poolest nidusad ja vibroplaadil tihenes segu kiirelt, vähemalt 30 sekundit kiiremini, kui tsemendiga tehtud retseptid.
- 5) Põletatud põlevkivi segusid on mõistlik tihendada vibroplaadiga, tihendamisnuiaga tihendades nidus segu kleepus nui külge ning raskendas tihendamist.
- 6) Tuhksideainega tehtud retseptid näitavad väiksemat hälbimist katsetulemuste, kui ka katsekehade tiheduste suhtes. Lihtsam on saavutada põletatud põlevkiviga ühtlaseid tulemusi võrreldes tuhksideainega tehtud retseptidel.
- 7) Tsement- ja tuhksideainega betoonid saavutavad ligikaudu sama suured paindetugevused alates 56 päeva vanuselt. Eelnevatel katseseerialtel on aga põletatud põlevkivi sideainega üldjuhul 10% nõrgem, kui tsementsideainega tehtud paindekatsekehad.
- 8) Põletatud põlevkivi sideaine saavutab 7 päeva vanuselt ligikaudu sama suure nakketugevuse, mida saadi 56 päeva vanustel kivistunud katsekehadel.
- 9) Tsementsideainega nakketugevused ei kasvanud märkimisväärselt võrreldes 7 ja 56 päeva vanuseid katsekehi. Suurim nakketugevuse täiendav kasv oli 33%, kuid pigem oli tegu erandiga, enamustel retseptidel saadi sama suured nakketugevused mõlemal katseseerial.

- 10) Tõmbetugevus tsementsideainega tehtud retseptidel märgatavalt ei kasvanud võrreldes 28 ja 56 päeva vanuseid katsekehi. Põletatud põlevkivi sideainega tehtud retseptide katsekehadel üldjuhul kasvas tõmbetugevus täiendava kivistumise perioodiga 50-70%.
- 11) 11:9 liiva fraktsioonide jaotusega tehtud retseptidel saavutati 5-10% suuremaid survetugevusi, kui seda 2:1 liiva fraktsioonide jaotusega.

Tulevastes uuringutes oleks oluline analüüsida, kuidas käesolevas lõputöös uuritud põletatud põlevkivi tuhk toimib 3D prinditavas betoonis ilma lisajahvatusega ning hinnata selle sobivust ehitusliku betoonina. Samuti oleks huvitav uurida uuritud retseptide omadusi ja mehaanilisi tulemusi 3D prinditud kujul.

SUMMARY

The thesis investigates the use of cement and fly ash binders in fine-grained concrete, incorporating superplasticizers, polypropylene fibers, and varying proportions of sand fractions. Key findings of the study include:

- 1) Recipes using burnt oil shale exhibited increased water demand. For instance, comparing recipe S8v (with fly ash binder) to S3v (with cement binder), the water demand increased by 27% for the fly ash binder to achieve equivalent slump on the flow table.
- 2) Recipes with burnt oil shale showed significantly slower early compressive strength development, at least three times slower than those with cement binder. For fiberless concretes, compressive strength was at least 370% higher for fly ash binder concrete compared to burnt oil shale binder recipes.
- 3) The rate of compressive strength development was faster for recipes with burnt oil shale compared to cement binder up to 28 days, due to the initially low early strength of fly ash binder recipes. Generally, growth rates were at least 10% faster for burnt oil shale recipes compared to cement binder recipes.
- 4) Fresh mixes with burnt oil shale recipes were cohesive in workability and compacted quickly on a vibrating table—at least 30 seconds faster than cement-based mixes.
- 5) Burnt oil shale mixes were more effectively compacted using a vibrating table. When compacted with a tamping rod, the cohesive mix adhered to the rod, hindering compaction.
- 6) Recipes using fly ash binder exhibited less variation in test results and specimen densities, suggesting more consistent outcomes compared to recipes with burnt oil shale.
- 7) Cement and fly ash binder concretes achieved comparable flexural strengths after 56 days. However, earlier test series showed that flexural test specimens with burnt oil shale binder were typically 10% weaker than those with cement binder.
- 8) Burnt oil shale binder achieved bond strength at 7 days comparable to that observed in hardened specimens at 56 days.
- 9) Cement binder bond strengths did not significantly increase between 7 and 56 days. The highest additional growth in bond strength was 33%, but this was an exception; most recipes showed similar bond strengths at both test ages.
- 10) Tensile strength of cement binder recipes showed no significant growth between 28 and 56 days. In contrast, tensile strength for burnt oil shale binder recipes generally increased by 50–70% with extended curing periods.

11) Recipes with an 11:9 sand fraction distribution achieved 5–10% higher compressive strengths compared to a 2:1 sand fraction distribution.

In future research, it would be valuable to examine how the burnt oil shale ash investigated in this thesis performs in 3D-printable concrete without additional grinding and assess its suitability for structural concrete applications. Furthermore, it would be of interest to evaluate the performance and mechanical properties of the studied recipes when applied in 3D-printed formats.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS 927:2018+A1:2024."
- [2] D. G. Soltan and V. C. Li, "A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing," *Cem Concr Compos*, vol. 90, pp. 1–13, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017.
- [3] J. Zhang, J. Wang, S. Dong, X. Yu, and B. Han, "A review of the current progress and application of 3D printed concrete," Oct. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105533.
- [4] T. A. M. Salet, Z. Y. Ahmed, F. P. Bos, and H. L. M. Laagland, "Design of a 3D printed concrete bridge by testing*," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 13, no. 3, pp. 222–236, Jul. 2018, doi: 10.1080/17452759.2018.1476064.
- [5] C. Zhang *et al.*, "Mix design concepts for 3D printable concrete: A review," Sep. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155.
- [6] 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," Dec. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.dibe.2023.100187.
- [7] H. Kloft *et al.*, "Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP)," *Cem Concr Res*, vol. 134, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106078.
- [8] Y. W. D. Tay, M. Y. Li, and M. J. Tan, "Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures," *J Mater Process Technol*, vol. 271, pp. 261–270, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.04.007.
- [9] S. Pranav, S. Aggarwal, E. H. Yang, A. Kumar Sarkar, A. Pratap Singh, and M. Lahoti, "Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review," Mar. 10, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117609.
- [10] Tiina Hain, "Põlevkivituhk betoonilisandina - baasuringud, 2021."

- [11] M. S. Nadesan and P. Dinakar, "Micro-structural behavior of interfacial transition zone of the porous sintered fly ash aggregate," *Journal of Building Engineering*, vol. 16, pp. 31–38, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2017.12.007.
- [12] W. T. Lin, "Reactive ultra-fine fly ash as an additive for cement-based materials," *Mater Today Commun*, vol. 25, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101466.
- [13] R. Lewis, L. Sear, P. Wainwright, and R. Ryle, "Cementitious additions."
- [14] L. Fiala, W. T. Lin, P. Hotěk, and A. Cheng, "Feasibility study of developing cementless blended materials as 3D printable materials," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02675.
- [15] C. Herath, C. Gunasekara, D. W. Law, and S. Setunge, "Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review," Oct. 20, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120606.
- [16] C. Herath, C. Gunasekara, D. W. Law, and S. Setunge, "Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review," Mar. 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120606.
- [17] P. S. Dong, N. Van Tuan, L. T. Thanh, N. C. Thang, V. H. Cu, and J. H. Mun, "Compressive strength development of high-volume fly ash ultra-high-performance concrete under heat curing condition with time," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 20, pp. 1–18, Oct. 2020, doi: 10.3390/app10207107.
- [18] P. Kara De Maeijer *et al.*, "Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability," *Constr Build Mater*, vol. 263, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120493.
- [19] L. Fiala, W. T. Lin, P. Hotěk, and A. Cheng, "Feasibility study of developing cementless blended materials as 3D printable materials," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02675.

- [20] N. L. N. Kiran Kumar and I. V. Ramana Reddy, "A study on the effect of NaOH molarity on flyash based self compacting geopolymers concrete," *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.144.
- [21] D. Ravikumar, S. Peethamparan, and N. Neithalath, "Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder," *Cem Concr Compos*, vol. 32, no. 6, pp. 399–410, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.03.007.
- [22] M. Colyn, G. van Zijl, and A. J. Babafemi, "Fresh and strength properties of 3D printable concrete mixtures utilising a high volume of sustainable alternative binders," *Constr Build Mater*, vol. 419, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135474.
- [23] Y. Peng and C. Unluer, "Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges," Mar. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110492.
- [24] A. Khalil, X. Wang, and K. Celik, "3D printable magnesium oxide concrete: towards sustainable modern architecture," *Addit Manuf*, vol. 33, May 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101145.
- [25] L. Wang, W. Lin, H. Ma, D. Li, and Q. Wang, "Mechanical and microstructural properties of 3D-printed aluminate cement based composite exposed to elevated temperatures," *Constr Build Mater*, vol. 353, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129144.
- [26] Y. A. Al-Noaimat *et al.*, "3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry," *Results in Engineering*, vol. 18, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101115.
- [27] Y. Chen, S. He, Y. Zhang, Z. Wan, O. Çopuroğlu, and E. Schlangen, "3D printing of calcined clay-limestone-based cementitious materials," *Cem Concr Res*, vol. 149, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106553.
- [28] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 480-1:2023 - Betooni, mördi ja süstmördi keemilised lisandid. Katsemeetodid. Osa 1: Katsetamisel kasutatav etalonbetoon ja etalonmört".

- [29] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 196-1:2016 - Tsemendi katsetamine. Osa 1: Tugevuse määramine".
- [30] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 1015-3:2004+A2:2007 - Müürimörtide katsemeetodid. Osa 3: Mõrdisegu konsistentsi määramine (raputuslaual) KONSOLIDEERITUD TEKST".
- [31] Toomas Erik Uus, "PURUSTATUD SILIKAATKIVIST TÄITEMATERJALI KASUTAMINE PÕLETATUD PÕLEVKIVI SIDEAINEGA 3D PRINDITAVAS BETOONIS, 2024."
- [32] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12390-2:2019 - Kivistunud betooni katsetamine. Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine".
- [33] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12390-3:2019 - Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus".
- [34] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 12390-4:2019 - Kivistunud betooni katsetamine. Osa 4: Survetugevus. Katsemasinatele esitatavad nõuded".
- [35] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, "EVS-EN 1015-12:2016 - Müürimörtide katsemeetodid. Osa 12: Kivistunud krohvimördi ja aluspinna nakketugevuse määramine".

LISAD

LISA 1 SURVETUGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL

Punasega tähistatud numbrid survetugevuse andmetes tähendab välja filtreeritud praaki, mida ei arvestatud aritmeetilise keskmise arvutamisel.

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa	Keskmine tihedus, kg/m ³		
48	S2v	08.01.2024	11.01.2024	3	1197,6	2188,3	2209	98,67	239,530	24,0	25,1	2190		
50			11.01.2024	3	1206,3	2207,5	2205	100,66	273,650	27,4				
51			11.01.2024	3	1144,6	2133,3	2158	99,23	261,570	26,2				
42					15.01.2024	7	1167,6	2176,6	2157	101,17	348,616	34,9	34,4	2165
43					15.01.2024	7	1160,6	2144,6	2179	98,46	326,801	32,7		
44					15.01.2024	7	1158,8	2159,1	2158	100,78	355,721	35,6		
47					22.01.2024	14	1165,4	2155,7	2177	99,85	405,033	40,5	40,0	2207
47.2					22.01.2024	14	1218,6	2183,6	2263	97,97	461,807	46,2		
50					22.01.2024	14	1179,5	2177,5	2182	100,96	395,228	39,5		
51.4					05.02.2024	28	1215	2206	2226	102,13	452,997	45,3	46,7	2219
52.3					05.02.2024	28	1219,8	2205,2	2238	101,2	494,067	49,4		
52.4					05.02.2024	28	1179,2	2167,2	2194	100,23	454,984	45,5		
45.19					04.03.2024	56	1181,8	2179,8	2184	101,44	490,23	49,0	49,0	2223
53.19					04.03.2024	56	1235,2	2214,8	2261	100,65	541,46	54,1		
46.19					04.03.2024	56	1200,2	2182	2222	102,53	325,022	X		
1	S3e	29.01.2024	03.02.2024	3	1174,4	2185,4	2162	99,83	314,223	31,4	32,9	2182		
2			03.02.2024	3	1207,2	2232,8	2177	101,23	249,186	24,9				
3			03.02.2024	3	1216,6	2224,4	2207	98,98	344,493	34,4				
7					05.02.2024	7	1243,6	2247	2239	99,43	402,902	40,3	37,7	2282
8					05.02.2024	7	1267,8	2169,6	2406	99,98	365,03	36,5		
9					05.02.2024	7	1203,6	2207,2	2199	101,21	362,116	36,2		
10					12.02.2024	14	1227,4	2226,8	2228	102,89	416,759	41,7	41,3	2208
11					12.02.2024	14	1200,8	2184,6	2221	104,21	420,24	42,0		
12					12.02.2024	14	1180,2	2185,6	2174	105,42	401,622	40,2		
16					26.02.2024	28	1181,8	2182,2	2181	101,62	423,011	42,3	44,0	2211
17					26.02.2024	28	1209,4	2209,4	2209	100,54	456,123	45,6		
18					26.02.2024	28	1240,6	2238,6	2243	101,61	493,712	49,4		
22					25.03.2024	56	1211,8	2200,6	2226	100,44	457	45,7	46,4	2215
23					25.03.2024	56	1211,2	2212,8	2209	101,56	406,17	40,6		
24					25.03.2024	56	1208,4	2207,6	2209	102,33	471,329	47,1		
1	S3v	29.01.2024	03.02.2024	3	1186,6	2227,8	2140	101,15	347,548	34,8	34,8	2149		
2			03.02.2024	3	1193,8	2219,8	2164	99,89	388,119	38,8				
3			03.02.2024	3	1216,4	2279,6	2144	100,14	399,631	40,0				
7			05.02.2024	7	1203,6	2221,6	2182	102,13	384,214	38,4				

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa	Keskmine tihedus, kg/m ³
8			05.02.2024	7	1192,8	2207	2176	101,32	376,753	37,7		
9			05.02.2024	7	1250,8	2278	2218	100,45	386,63	38,7		
10			12.02.2024	14	1208,2	2234,2	2178	103,52	433,533	43,4		
11			12.02.2024	14	1218,2	2245,4	2186	102,42	414,556	41,5		
12			12.02.2024	14	1225,2	2247,8	2198	100,21	432,533	43,3		
16			26.02.2024	28	1196,6	2210,4	2180	103,25	459,106	45,9	42,7	2187
17			26.02.2024	28	1201,6	2211,6	2190	101,16	466,425	46,6		
18			26.02.2024	28	1248,6	2263,4	2230	102,42	528,175	52,8	46,3	2200
22			25.03.2024	56	1236,8	2240,8	2232	99,98	512,752	51,3		
23			25.03.2024	56	1218,6	2229	2206	101,42	491,296	49,1	49,1	2212
24			25.03.2024	56	1206,4	2213,6	2198	100,55	469,482	46,9		
1			S4v	31.01.2024	03.02.2024	3	1201,8	2218,8	2182	100,14	308,609	30,9
2	03.02.2024	3			1179,6	2169,4	2192	99,78	312,802	31,3		
3	03.02.2024	3			1196,2	2197,2	2195	101,15	248,478	24,8		
7	07.02.2024	7			1206,6	2213,2	2199	101,13	317,706	31,8	31,8	2216
8	07.02.2024	7			1167,4	2159,2	2177	99,61	360,482	36,0		
9	07.02.2024	7			1257,2	2245,2	2272	99,63	449,16	44,9		
10	14.02.2024	14			1216,2	2220,2	2211	103,56	451,648	45,2	46,7	2222
11	14.02.2024	14			1279,2	2297,8	2256	101,75	482,202	48,2		
12	14.02.2024	14			1226,4	2249,2	2199	99,86	419,956	42,0		
16	28.02.2024	28			1229,6	2242,4	2214	101,46	454,276	45,4	46,8	2222
17	28.02.2024	28			1222,2	2214,2	2232	102,04	479,358	47,9		
18	28.02.2024	28			1212,8	2207	2220	99,32	471,471	47,1		
22	27.03.2024	56	1248,4	2237,2	2263	99,87	555,958	55,6	53,6	2246		
23	27.03.2024	56	1219,6	2218,6	2221	101,15	513,535	51,4				
24	27.03.2024	56	1260	2264,2	2255	100,88	539,117	53,9				
1	S4e	31.01.2024	03.02.2024	3	1194	2201	2186	98,89	327,013	32,7	34,4	2220
2			03.02.2024	3	1242,2	2254,4	2227	101,11	347,335	34,7		
3			03.02.2024	3	1259,2	2270	2246	99,78	356,217	35,6		
7			07.02.2024	7	1192,8	2187,7	2199	99,95	320,193	32,0	32,6	2187
8			07.02.2024	7	1174,8	2163	2189	99,26	328,08	32,8		
9			07.02.2024	7	1176	2179,2	2172	100,47	328,364	32,8		
10			14.02.2024	14	1167,2	2160,8	2175	103,83	403,968	40,4	41,4	2204
11			14.02.2024	14	1221,2	2218,6	2224	101,84	416,83	41,7		
12			14.02.2024	14	1203,4	2194,4	2214	99,63	419,883	42,0		
16			28.02.2024	28	1187,6	2183,8	2192	101,32	447,241	44,7	48,1	2235
17			28.02.2024	28	1246,8	2240	2255	100,64	491,794	49,2		
18			28.02.2024	28	1249,6	2243,8	2257	99,69	504,51	50,5		
22	27.03.2024	56	1230,8	2220,2	2244	100,55	536,56	53,7	53,3	2238		
23	27.03.2024	56	1196,2	2188,6	2205	101,31	498,544	49,9				

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa	Keskmine tihedus, kg/m ³
24			27.03.2024	56	1264,4	2264,4	2264	102,74	563,843	56,4		
1	S5e	03.02.2024	06.02.2024	3	1241,8	2244,2	2239	100,97	398,868	39,9	39,9	2232
2			06.02.2024	3	1216,2	2207,8	2227	99,64	358,492	35,8		
3			06.02.2024	3	1246	2259,2	2230	101,91	399,065	39,9		
7			10.02.2024	7	1217,2	2210	2226	100,32	461,879	46,2	46,5	2235
8			10.02.2024	7	1254,2	2261,2	2245	103,42	473,461	47,3		
9			10.02.2024	7	1233,8	2235,2	2232	99,32	461,097	46,1		
10			17.02.2024	14	1231,6	2229,6	2234	100,48	460,387	46,0	51,8	2236
11			17.02.2024	14	1243,4	2251,4	2234	101,3	523,485	52,3		
12			17.02.2024	14	1245,8	2250,8	2240	100,5	512,045	51,2		
16			02.03.2024	28	1214,4	2244,4	2179	100,21	561,784	56,2	55,8	2222
17			02.03.2024	28	1256,6	2264,6	2247	99,86	531,94	53,2		
18			02.03.2024	28	1243,4	2247	2239	103,56	580,256	58,0		
22			30.03.2024	56	1258,4	2263,4	2252	101,13	632,66	63,3	62,8	2253
23			30.03.2024	56	1246,4	2239	2256	104,37	630,16	63,0		
24			30.03.2024	56	1245,6	2240,6	2252	102,49	621,784	62,2		
1			S5v	03.02.2024	06.02.2024	3	1203,6	2205,6	2201	100,88	336,390	33,6
2	06.02.2024	3			1191,8	2189,4	2195	99,63	328,009	32,8		
3	06.02.2024	3			1180,2	2162,8	2201	98,68	296,963	29,7		
7	10.02.2024	7			1240,4	2234,8	2247	102,35	421,519	42,2	37,0	2215
8	10.02.2024	7			1211,8	2223	2198	99,31	372,49	37,2		
9	10.02.2024	7			1209,2	2216,6	2200	102,34	367,587	36,8		
10	17.02.2024	14			1198,4	2196	2201	99,82	405,105	40,5	40,4	2205
11	17.02.2024	14			1182,2	2159	2210	99,17	401,979	40,2		
12	17.02.2024	14			1185,8	2171,2	2203	99,35	405,105	40,5		
16	02.03.2024	28			1196,2	2184,4	2210	101,22	449,515	45,0	46,0	2219
17	02.03.2024	28			1209,6	2206,8	2213	100,17	459,816	46,0		
18	02.03.2024	28			1210,6	2192,4	2233	99,97	471,469	47,1		
22	30.03.2024	56			1209,6	2196,6	2226	101,44	496,98	49,7	49,3	2243
23	30.03.2024	56			1212,6	2195,4	2234	99,78	489,306	48,9		
24	30.03.2024	56			1252,2	2239	2269	103,76	553,186	55,3		
1	S6e	04.02.2024			07.02.2024	3	1201,8	2208,4	2194	100,9	198,887	19,9
2			07.02.2024	3	1201	2210,4	2190	101,48	182,833	18,3		
3			07.02.2024	3	1193,2	2198	2188	100,94	184,758	18,5		
7			11.02.2024	7	1197,2	2200	2194	102,42	368,013	36,8	35,7	2185
8			11.02.2024	7	1170,4	2167,2	2174	103,21	352,594	35,3		
9			11.02.2024	7	1190,6	2193,6	2187	99,82	350,815	35,1		
10			18.02.2024	14	1183	2184,4	2181	100,2	447,381	44,7	45,9	2178
11			18.02.2024	14	1214	2242,2	2181	101,86	487,531	48,8		

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa	Keskmine tihedus, kg/m ³
12			18.02.2024	14	1216,2	2255	2171	103,19	442,481	44,2	55,8	2200
16			03.03.2024	28	1223,6	2241,6	2202	100,68	582,106	58,2		
17			03.03.2024	28	1221	2237	2202	101,23	534,427	53,4		
18			03.03.2024	28	1208,2	2217	2198	100,88	556,24	55,6		
22			31.03.2024	56	1214,4	2218,2	2210	99,34	563,134	56,3	56,9	2217
23			31.03.2024	56	1218,4	2214,8	2223	104,52	575,498	57,5		
24			31.03.2024	56	1196,8	2180,2	2217	104,14	494,067	49,4		
1	S6e2	31.01.2024	03.02.2024	3	1135,8	2142,2	2129	99,65	68,131	6,8	7,0	2130
2			03.02.2024	3	1141,1	2152,8	2128	101,45	69,336	6,9		
3			03.02.2024	3	1148,4	2162,8	2132	100,76	72,856	7,3		
7			07.02.2024	7	1147,6	2154,8	2139	101,24	200,496	20,0	20,2	2138
8			07.02.2024	7	1151,8	2162,4	2140	102,19	202,864	20,3		
9			07.02.2024	7	1154,6	2173	2134	101,44	177,734	17,8		
10			14.02.2024	14	1167,4	2191,6	2140	103,85	319,622	32,0	31,3	2139
11			14.02.2024	14	1142,2	2146,4	2137	98,75	312,661	31,3		
12			14.02.2024	14	1148,8	2156,2	2140	100,96	306,621	30,7		
16			28.02.2024	28	1143,4	2141,8	2145	103,53	333,338	33,3	33,7	2142
17			28.02.2024	28	1141,6	2144,4	2138	105,38	356,929	35,7		
18			28.02.2024	28	1149,8	2155,6	2143	99,73	320,335	32,0		
22			27.03.2024	56	1150,2	2157,2	2142	101,33	423,935	42,4	41,7	2143
23			27.03.2024	56	1156,4	2167	2144	100,17	426,42	42,6		
24			27.03.2024	56	1154,2	2164,8	2142	99,87	399,918	40,0		
1			S7e2	31.01.2024	03.02.2024	3	1152,6	2164,2	2139	99,98	80,087	8,0
2	03.02.2024	3			1141	2148,8	2132	101,11	78,668	7,9		
3	03.02.2024	3			1139,4	2147,4	2130	100,43	79,970	8,0		
7	07.02.2024	7			1137,8	2140	2119	100,41	162,325	16,2	15,9	2093
8	07.02.2024	7			1110,6	2112,6	2056	99,97	143,261	14,3		
9	07.02.2024	7			1140	2150,8	2104	101,42	156,48	15,6		
10	14.02.2024	14			1158,8	2176	2139	100,85	293,431	29,3	30,1	2138
11	14.02.2024	14			1136,6	2138	2135	98,74	302,997	30,3		
12	14.02.2024	14			1146,4	2152,4	2140	103,53	305,484	30,5		
16	28.02.2024	28			1155,6	2174,6	2134	103,28	370,5	37,1	37,2	2139
17	28.02.2024	28			1155,6	2169,4	2140	101,82	360,481	36,0		
18	28.02.2024	28			1164,4	2181,8	2144	99,45	385,067	38,5		
22	27.03.2024	56			1160,6	2177,4	2141	103,21	397,857	39,8	40,1	2140
23	27.03.2024	56			1156,4	2171,8	2139	101,18	353,822			
24	27.03.2024	56			1160,2	2177,4	2141	99,99	404,108	40,4		
1	S8e2	01.02.2024			04.02.2024	3	1132,8	2145,6	2118	99,97	84,980	8,5
2			04.02.2024	3	1122,6	2133,8	2110	101,65	76,682	7,7		

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa	Keskmine tihedus, kg/m ³		
3			04.02.2024	3	1117,8	2126	2109	100,18	73,445	7,3	19,4	2121		
7			08.02.2024	7	1143,6	2157	2128	101,31	199,173	19,9				
8			08.02.2024	7	1151,8	2180,2	2120	103,18	198,027	19,8				
9			08.02.2024	7	1122,8	2130,8	2114	101,54	185,71	18,6				
10					15.02.2024	14	1127,8	2138,4	2116	102,21	264,257	26,4	27,3	2117
11					15.02.2024	14	1120,8	2122,6	2119	99,83	275,7	27,6		
12					15.02.2024	14	1128,8	2140,2	2116	98,54	279,02	27,9		
16					29.02.2024	28	1149,8	2173,2	2124	101,62	355,65	35,6	35,9	2122
17					29.02.2024	28	1132,2	2144,6	2118	102,86	361,476	36,1		
18					29.02.2024	28	1146,8	2166	2125	99,32	360,125	36,0		
22					28.03.2024	56	1172,6	2200	2141	100,14	418	41,8	40,7	2132
23					28.03.2024	56	1144,8	2162	2125	99,65	400	40,0		
24					28.03.2024	56	1159,2	2184,8	2130	101,11	402,188	40,2		
1					S8v	01.02.2024	04.02.2024	3	1148,8	2171,4	2123	101,56	86,479	8,6
2	04.02.2024	3					1125,4	2127,8	2123	98,75	72,998	7,3		
3	04.02.2024	3					1117,4	2113,6	2122	97,98	81,504	8,2		
7	08.02.2024	7					1152,2	2172,4	2129	102,3	203,055	20,3	20,8	2128
8	08.02.2024	7					1158,4	2182,8	2131	101,85	211,979	21,2		
9	08.02.2024	7	1141,2	2156			2125	100,84	184,823	18,5				
10	15.02.2024	14	1161,6	2185,4			2135	103,65	312,448	31,2	31,3	2135		
11	15.02.2024	14	1156,4	2175,4			2135	104,68	316,356	31,6				
12	15.02.2024	14	1169,4	2198,2			2137	101,45	310,885	31,1				
16	29.02.2024	28	1157,8	2176,6			2136	104,21	394,446	39,4	38,9	2136		
17	29.02.2024	28	1148,6	2163			2132	102,34	381,443	38,1				
18	29.02.2024	28	1160,4	2179			2139	101,78	391,533	39,2				
22	28.03.2024	56	1171,4	2194,4			2145	102,88	456,407	45,6	42,2	2148		
23	28.03.2024	56	1158,4	2166,6			2149	104,15	411,001	41,1				
24	28.03.2024	56	1176,8	2200,2	2150	100,81	398,07	39,8						
1	S9e2	01.02.2024	04.02.2024	3	1128,8	2141	2115	100,56	82,079	8,2	8,3	2117		
2			04.02.2024	3	1130,8	2149,2	2110	100,13	83,040	8,3				
3			04.02.2024	3	1142,4	2156,6	2126	100,19	84,971	8,5				
7			08.02.2024	7	1129,6	2144,4	2113	102,21	198,336	19,8	19,9	2115		
8			08.02.2024	7	1130,4	2146	2113	102,15	199,119	19,9				
9			08.02.2024	7	1123,4	2128,6	2118	101,48	167,667	16,8				
10			15.02.2024	14	1145,6	2163	2126	98,06	301,079	30,1	30,8	2129		
11			15.02.2024	14	1143,6	2150,8	2135	102,74	303,495	30,3				
12			15.02.2024	14	1156,8	2183,8	2126	101,58	318,557	31,9				
16			29.02.2024	28	1150,2	2174,2	2123	99,82	392,457	39,2	39,5	2130		
17			29.02.2024	28	1152,2	2170,2	2132	102,85	398,141	39,8				

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Kõrgus, mm	Purustav jõud, kN	Survetugevus, MPa	Keskmine survetugevus, MPa	Keskmine tihedus, kg/m ³			
18			29.02.2024	28	1146	2155,4	2135	103,59	334,191	33,4					
22			28.03.2024	56	1164,4	2180,2	2146	100,15	396,648	39,7	40,2	2149			
23			28.03.2024	56	1171,8	2184,2	2157	99,9	407,733	40,8					
24			28.03.2024	56	1152,8	2161,4	2143	104,21	401,551	40,2					
1	S9v	01.02.2024	04.02.2024	3	1134,2	2144	2123	99,97	64,546	6,5	6,7	2121			
2			04.02.2024	3	1131,2	2138,4	2123	100,12	70,389	7,0					
3			04.02.2024	3	1128,4	2139,8	2116	101,32	77,715	7,8					
7			08.02.2024	7	1140	2159,2	2119	101,55	181,284	18,1					
8			08.02.2024	7	1139,2	2162,6	2113	101,9	167,979	16,8		17,2	2118		
9			08.02.2024	7	1128,2	2134,6	2121	101,71	165,533	16,6					
10			15.02.2024	14	1125,2	2126	2124	99,84	285,519	28,6					
11			15.02.2024	14	1115	2113,2	2117	103,82	275,63	27,6		28,2	2121		
12			15.02.2024	14	1145	2165,2	2122	104,83	286,155	28,6					
16			29.02.2024	28	1146,4	2162,4	2128	99,89	366,592	36,7					
17			29.02.2024	28	1125,6	2130	2121	101,13	357,852	35,8		36,7	2125		
18			29.02.2024	28	1138,8	2151,2	2125	100,85	377,888	37,8					
22			28.03.2024	56	1153,2	2157,8	2148	100,16	407,875	40,8					
23			28.03.2024	56	1140,6	2135	2147	99,97	401,196	40,1		40,6	2147		
24			28.03.2024	56	1154,2	2162,2	2145	104,19	407,733	40,8					
1			S10e	04.02.2024	07.02.2024	3	1221,2	2246,2	2191	101,13	281,281	28,1	39,8	2197	
2					07.02.2024	3	1213,2	2228,2	2195	102,34	385,849	38,6			
3					07.02.2024	3	1224,6	2240,6	2205	99,58	410,718	41,1			
4					03.03.2024	28	1215,6	2217,4	2213	100,84	594,896	59,5			
5					03.03.2024	28	1231,6	2244	2217	102,32	499,965	50,0		57,7	2212
6					03.03.2024	28	1228,6	2247,2	2206	101,35	559,437	55,9			

Lisa 1 survetugevuse katsekehade andmed [31]

LISA 2 PAINDETUGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Purustav jõud, kN			Proovikeha mõõtmed			Paindetugevus, MPa		Survetugevus, MPa			Keskmine tihedus kg/m ³	Paindetugevus, MPa	Survetugevus, MPa						
								Paindel	Survel 1	Survel 2	pikkus	laius	kõrgus	Üksik	Keskmine	Üksik 1	Üksik 2	Keskmine									
11	S2v	08.01.2024	15.01.2024	7	308,8	568,4	2190	3,15	54,5	58	160,72	40,13	40,53	7,4	7,5	34,1	36,3	33,5	2183,85	7,5	33,5						
12			15.01.2024	7	306,8	568,1	2174	3,35	50	50	160,48	41,14	40,11	7,9		31,3	31,3										
13			15.01.2024	7	314,2	578,7	2188	3,1	59	50	160,43	40,43	40,86	7,3		36,9	31,3										
1			S2v	08.01.2024	05.02.2024	28	306,6	566,6	2179	3,65	71	71	160,2	40,41	41,23	8,6	9,1	44,4		44,4	43,0	2186,74	9,1	43,0			
2					05.02.2024	28	306,4	564	2189	3,9	66	66	160,3	40,12	40,15	9,1		41,3		41,3							
3					05.02.2024	28	309,8	569,8	2192	4,05	69	70	160,1	40,56	41,12	9,5		43,1		43,8							
7					S2v	08.01.2024	04.03.2024	56	311,2	572,4	2191	3,9	80	77	159,83	40,21	40,18	9,1		9,2	50,0		48,1	50,4	2195,10	9,6	50,4
8							04.03.2024	56	299,4	549,6	2197	3,95	85	83	160,64	40,16	40,29	9,3			53,1		51,9				
9							04.03.2024	56	312	572,6	2197	4,45	76	83	161,12	41,21	41,22	10,4			47,5		51,9				
1	S3e	29.01.2024					05.02.2024	7	314,8	578	2196	3,55	58	56	160,2	40,23	40,15	8,3	8,6	36,3	35,0		36,5	2199,60		8,6	36,5
2							05.02.2024	7	315,8	578,6	2202	3,65	68	64	160,6	41,13	40,25	8,6		42,5	40,0						
3							05.02.2024	7	316,6	580,2	2201	3,8	52	52	160,7	40,46	41,25	8,9		32,5	32,5						
4			S3e	29.01.2024			26.02.2024	28	317,8	580,4	2210	3,75	71,5	67,5	160,32	40,15	40,65	8,8	9,1	44,7	42,2	44,5	2215,16			9,1	44,5
5							26.02.2024	28	319,5	581,4	2220	4,1	69	70	160,57	40,28	40,26	9,6		43,1	43,8						
6							26.02.2024	28	313,8	572	2215	3,75	78	71	160,54	40,15	41,62	8,8		48,8	44,4						
7					S3e	29.01.2024	25.03.2024	56	319,6	578,6	2234	3,9	83	83,5	160,13	40,55	40,67	9,1	9,4	51,9	52,2	48,2			2232,08	9,4	48,2
8							25.03.2024	56	317,4	576,6	2225	3,95	75	79	161	41,12	41,04	9,3		46,9	49,4						
9							25.03.2024	56	322,8	583,6	2238	4,2	70	72	160,77	40,24	40,25	9,8		43,8	45,0						
1	S3v	29.01.2024					05.02.2024	7	340	620,4	2213	4,2	66	60	159,9	40,32	40,53	9,8	9,4	41,3	37,5	38,0		2198,40		8,8	38,0
2							05.02.2024	7	323,2	593	2198	3,8	60	58	159,8	40,14	41,24	8,9		37,5	36,3						
3							05.02.2024	7	313	577,2	2185	3,2	60	61	160	41,25	40,67	7,5		37,5	38,1						
4			S3v	29.01.2024			26.02.2024	28	328,2	601,2	2202	4,2	74	77	160,82	40,72	40,81	9,8	9,8	46,3	48,1	46,4	2207,96			9,3	46,4
5							26.02.2024	28	329,8	603	2207	3,55	73	70	161,43	41,92	42,21	8,3		45,6	43,8						
6							26.02.2024	28	328,4	598,8	2214	4,2	79	72	160,48	40,81	40,76	9,8		49,4	45,0						
7					S3v	29.01.2024	25.03.2024	56	325	599,4	2184	4,7	84	82	161	40,55	40,1	11,0	10,9	52,5	51,3	52,0			2188,83	10,5	52,0
8							25.03.2024	56	325,2	598,2	2191	4,1	78	79	160,18	40,11	40,54	9,6		48,8	49,4						
9							25.03.2024	56	329,4	606	2191	4,6	89	87	160,3	39,98	39,88	10,8		55,6	54,4						
1	S4e	31.01.2024					07.02.2024	7	320,4	584,4	2260	3	65	66	160,54	39,74	42,01	7,0	7,5	40,6	40,9	38,9		2242,24		7,5	38,9
2							07.02.2024	7	324,6	592,2	2285	3,2	57	60	160,26	40,8	42,16	7,5		35,6	37,5						
3							07.02.2024	7	330	601,4	2182	3,35	62	64	161,43	40,86	42,02	7,9		38,8	40,0						
4			S4e	31.01.2024			28.02.2024	28	335,6	611,2	2218	4,9	74	76	160,82	40,13	41,1	11,5	11,1	53,8	53,4	51,5	2223,36			10,5	51,5
5							28.02.2024	28	335,6	612,2	2213	3,9	77	74	160,62	41,75	41,21	9,1		48,1	46,3						
6							28.02.2024	28	323,4	584,4	2239	4,6	86	85,5	160,42	42,32	42,14	10,8		53,8	53,4						
7					S4e	31.01.2024	27.03.2024	56	329	599,8	2215	4,35	84	84	160,88	41,63	41,55	10,2	10,3	52,5	52,5	56,3			2234,92	10,3	56,3
8							27.03.2024	56	322,6	583,4	2237	4,45	92	95	160,16	40,58	40,27	10,4		57,5	59,4						
9							27.03.2024	56	328	589,8	2253	4,4	95	90	160,53	41,16	41,19	10,3		59,4	56,3						
1	S4v	31.01.2024					07.02.2024	7	325,8	597,8	2198	3,2	62	60	161,7	40,03	43,38	7,5	7,4	38,8	37,5	37,8		2211,67		5,7	37,8
2							07.02.2024	7	333	604,2	2228	3,15	60	60	160,89	40,41	42,31	7,4		37,5	37,5						

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgetihedus	Purustav jõud, kN			Proovikeha mõõtmed			Paindetugevus, MPa		Survetugevus, MPa			Keskmine tihedus kg/m³	Paindetugevus, MPa	Survetugevus, MPa
								Paindel	Survel 1	Survel 2	pikkus	laius	kõrgus	Üksik	Keskmine	Üksik 1	Üksik 2	Keskmine			
3			07.02.2024	7	325,8	595,2	2209	1	60	61	161,38	40,65	43,44	2,3		37,5	38,1				
4			28.02.2024	28	330,6	598,2	2235	4,125	76	78	160,52	41,82	40,89	9,7		47,5	48,8				
5			28.02.2024	28	326,4	593,8	2221	3,85	76	73	161,86	42,32	42,52	9,0	9,6	47,5	45,6	46,8	2231,43	9,6	46,8
6			28.02.2024	28	336,8	608,8	2238	4,35	72	74	159,81	40,86	40,82	10,2		45,0	46,3				
7			27.03.2024	56	329,8	599,2	2224	1,95	87	84	160,12	41,11	41,16	4,6		54,4	52,5				
8			27.03.2024	56	322	586	2220	3,35	85	87	160	40,62	40,55	7,9	6,3	53,1	54,4	52,6	2219,86	6,3	52,6
9			27.03.2024	56	322,4	587,6	2216	2,8	82	80	162,42	40,16	40,12	6,6		51,3	50,0				
1			10.02.2024	7	332,2	598,6	2247	4,075	78	80	159,82	41,12	42,56	9,6		48,8	49,7				
2			10.02.2024	7	340,6	616,8	2233	4,1	79	75	160,68	40,67	43,12	9,6	9,8	49,4	46,9	48,8	2241,67	9,8	48,8
3			10.02.2024	7	338,6	610,6	2245	4,35	78	79	161,12	39,86	40,24	10,2		48,8	49,4				
4			02.03.2024	28	332	599,6	2241	4,7	100	77	162,34	40,21	40,54	11,0		62,5	48,1				
5	S5e	03.02.2024	02.03.2024	28	333,2	600,6	2246	4,2	85	84	160,21	40,13	40,15	9,8	11,0	53,1	52,5	54,2	2245,03	11,1	54,2
6			02.03.2024	28	341,8	615,6	2248	5,25	90	84	161,36	40,1	40	12,3		56,3	52,5				
7			30.03.2024	56	335,8	595,8	2292	3,8	105	105	160,53	40,23	40,53	8,9		65,6	65,6				
8			30.03.2024	56	341,8	610	2274	3,85	110	109	161,12	41,52	42,17	9,0	9,0	68,8	68,1	65,5	2276,86	9,3	65,5
9			30.03.2024	56	337,4	604,2	2265	4,3	100	100	160,93	43,67	43,73	10,1		62,5	62,5				
1			10.02.2024	7	320,4	584,2	2215	3,45	69	65	161,32	40,12	40,23	8,1		43,1	40,6				
2			10.02.2024	7	325,2	593,2	2213	3,525	63	65	160,32	41,25	41,56	8,3	8,2	39,4	40,6	39,6	2216,46	8,6	39,6
3			10.02.2024	7	326,6	594	2221	4	59	59	159,62	39,89	40,12	9,4		36,9	36,9				
4			02.03.2024	28	331,4	601,6	2226	4,1	72	69	160,24	40,25	41,55	9,6		45,0	43,1				
5	S5v	03.02.2024	02.03.2024	28	330,6	597,4	2239	4,55	70	67	160,15	40,16	40,24	10,7	9,7	43,8	41,9	43,6	2231,84	10,0	43,6
6			02.03.2024	28	327,4	593,6	2230	4,15	72	69	159,98	41,11	41,02	9,7		45,0	43,1				
7			30.03.2024	56	332,6	597,2	2257	4,125	83	84	160,52	40,52	40,44	9,7		51,9	52,5				
8			30.03.2024	56	328,6	592,2	2247	4	80	85	161,21	41,31	41,12	9,4	9,5	50,0	53,1	52,3	2249,41	9,5	52,3
9			30.03.2024	56	336,8	607,4	2245	4,025	86	84	160,14	40,63	40,75	9,4		53,8	52,5				
1			11.02.2024	7	283,8	533,8	2135	1,7	27	28	159,32	39,21	42,32	4,0		16,9	17,5				
2			11.02.2024	7	287,8	538,8	2147	2,05	37	36	161,32	43,21	40,59	4,8	4,0	23,1	22,2	20,5	2140,20	4,3	20,5
3			11.02.2024	7	287,2	539,4	2139	1,7	37	32	160,43	41,23	42,68	4,0		23,1	20,0				
4			03.03.2024	28	296,8	554,2	2153	2,7	35	40	160,84	40,11	40,53	6,3		21,9	25,0				
5	S6e	04.02.2024	03.03.2024	28	279,8	526	2136	2,85	25	33	160,47	41,04	41,15	6,7	6,5	15,6	20,6	21,0	2145,16	6,0	21,0
6			03.03.2024	28	287,4	538,2	2146	2,1	37	31,5	160,83	40,1	40,08	4,9		23,1	19,7				
7			31.03.2024	56	292,4	544,8	2158	2,85	32	31	160,16	40,43	41,11	6,7		20,0	19,4				
8			31.03.2024	56	296,2	547,8	2177	3,15	30	34	161,42	41,12	42,35	7,4	6,7	18,8	21,3	20,7	2161,73	6,4	20,7
9			31.03.2024	56	284,6	532,2	2149	2,2	35	37	160,94	40,63	40,64	5,2		21,9	23,1				
1			07.02.2024	7	302,4	570,4	2128	1,75	23	25	160,27	40,03	42,7	4,1		14,4	15,6				
2			07.02.2024	7	299,8	565,6	2128	1,7	22	25	160,87	39,99	42,15	4,0	4,0	13,8	15,6	14,8	2129,50	3,1	14,8
3			07.02.2024	7	310	583,8	2132	0,5	24	23	161,31	40,51	42,84	1,2		15,0	14,4				
4	S6e2	31.01.2024	28.02.2024	28	310,8	582,4	2144	3,3	56	53,5	160,32	41,52	41,72	7,7		35,0	33,4				
5			28.02.2024	28	303,2	570,2	2136	3,75	52,5	55	161,83	41,84	41,24	8,8	7,6	32,8	34,4	33,3	2135,73	8,0	33,3
6			28.02.2024	28	308,2	581,6	2127	3,15	52	51	160,13	40,12	40,62	7,4		32,5	31,9				
7			27.03.2024	56	303	566,6	2149	3,9	63	61	160	41,56	40,62	9,1	9,1	39,4	38,1	39,8	2148,26	9,1	39,8

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgetihedus	Purustav jõud, kN			Proovikeha mõõtmed			Paindetugevus, MPa		Survetugevus, MPa			Keskmine tihedus kg/m ³	Paindetugevus, MPa	Survetugevus, MPa		
								Paindel	Survel 1	Survel 2	pikkus	laius	kõrgus	Üksik	Keskmine	Üksik 1	Üksik 2	Keskmine					
8			27.03.2024	56	313,8	587,4	2147	3,75	65	67	161,63	41,74	41,66	8,8		40,6	41,9						
9			27.03.2024	56	303,4	567,6	2148	3,95	63	63	160,45	41,63	41,55	9,3		39,4	39,4						
1	S7e2	31.01.2024	07.02.2024	7	308,6	580,4	2135	1,25	23	24	160,74	40,85	42,55	2,9	2,9	14,4	15,0	14,5	2135,40	3,4	14,5		
2			07.02.2024	7	306	576,6	2131	1,65	23	25	160,9	41,14	42,74	3,9		14,4	15,6						
3			07.02.2024	7	307,8	577,8	2140	1,4	22	22	162,28	40,44	42,83	3,3		13,8	13,8						
4			28.02.2024	28	307,2	575,8	2144	3,35	58	56	160,85	40,15	40,12	7,9	7,9	36,3	35,0	33,0		2146,26	8,3	33,0	
5			28.02.2024	28	310,2	581,8	2142	3,4	50	47	161,36	41,23	41,15	8,0		31,3	29,4						
6			28.02.2024	28	313,6	585,6	2153	3,9	54	52	159,89	40,26	40,67	9,1		33,8	32,5						
7			27.03.2024	56	310,6	581,8	2145	4,4	63	67	160,52	40,88	40,77	10,3	9,8	39,4	41,9	41,3			2150,55	9,6	41,3
8			27.03.2024	56	308,6	576	2154	3,9	70	65	161,37	41,35	41,17	9,1		43,8	40,6						
9			27.03.2024	56	317,8	593,6	2152	4	65	66	160,43	42,16	42,06	9,4		40,6	41,3						
1	S8e2	01.02.2024	08.02.2024	7	300,2	568,8	2118	2,05	19	22	161,16	40,26	42,56	4,8	4,8	11,9	13,8	12,1	2103,10			4,7	12,1
2			08.02.2024	7	295,2	560,4	2113	2,3	19	17	161,26	40,42	43,14	5,4		11,9	10,6						
3			08.02.2024	7	296,6	571,6	2079	1,7	19	20	161,82	41,03	42,07	4,0		11,9	12,5						
4			29.02.2024	28	306,6	578,2	2129	3,25	52,5	55	160,42	40,75	40,32	7,6	7,7	32,8	34,4	34,1		2129,56		7,7	34,1
5			29.02.2024	28	306	575,8	2134	3,5	55	57	161,48	41,86	41,88	8,2		34,4	35,6						
6			29.02.2024	28	306,4	578,6	2126	3,15	55	53	160,14	41,88	40,79	7,4		34,4	33,1						
7			28.03.2024	56	310,6	584,4	2134	4	64	61	160,56	40,14	41,14	9,4	9,1	40,0	38,1	40,0			2132,73	9,5	40,0
8			28.03.2024	56	306,2	575,6	2137	3,7	66	65	161,13	41,11	43,16	8,7		41,3	40,6						
9			28.03.2024	56	308,4	582	2127	4,4	65	63	161,1	40,55	40,77	10,3		40,6	39,4						
1	S8v	01.02.2024	08.02.2024	7	302,8	573,4	2119	1,8	17	16	161,34	41,31	41,34	4,2	4,2	10,6	10,0	10,8	2128,12			4,2	10,8
2			08.02.2024	7	300,8	565,8	2135	1,9	16	18	160,79	40,83	41,68	4,5		10,0	11,3						
3			08.02.2024	7	305,4	575,6	2130	1,7	18	19	161,06	40,99	42,64	4,0		11,3	11,9						
4			29.02.2024	28	308,4	579,2	2139	2,9	58,5	59	160,84	40,32	40,44	6,8	6,9	36,6	36,9	35,4		2137,59		6,9	35,4
5			29.02.2024	28	310,6	583,2	2139	3,15	59	55,5	160,55	41,85	41,53	7,4		36,9	34,7						
6			29.02.2024	28	303,6	571,2	2135	2,75	54	54	161,9	40,66	40,35	6,4		33,8	33,8						
7			28.03.2024	56	308,6	578,8	2142	4,2	67	68	160,18	41,11	42,15	9,8	9,3	41,9	42,5	42,4			2149,27	9,3	42,4
8			28.03.2024	56	308,6	576,2	2153	3,825	66	70	160,22	40,77	40,51	9,0		41,3	43,8						
9			28.03.2024	56	308,4	576	2152	3,9	69	67	160,67	41	41,67	9,1		43,1	41,9						
1	S9e2	01.02.2024	08.02.2024	7	317,2	597	2134	2,3	21	19	161,93	41,42	42,31	5,4	5,4	13,1	11,9	12,9	2142,79			5,4	12,9
2			08.02.2024	7	308,4	577,6	2146	2,3	23	22	161,64	39,88	41,94	5,4		14,4	13,8						
3			08.02.2024	7	300,6	562,2	2149	2,25	17	22	160,97	39,97	41,48	5,3		10,6	13,8						
4			29.02.2024	28	312	588,4	2129	3,4	55	52	160,85	40,31	40,17	8,0	8,1	34,4	32,5	34,3		2138,02		8,1	34,3
5			29.02.2024	28	308,8	582	2130	3,45	54	51	161,41	41,14	41,12	8,1		33,8	31,9						
6			29.02.2024	28	308,6	575,8	2155	3,55	64	63	160,88	39,98	40,34	8,3		33,8	39,4						
7			28.03.2024	56	319,8	595,8	2159	4,15	70	67	160,78	40,25	42,16	9,7	9,6	43,8	41,9	43,1			2152,91	9,2	43,1
8			28.03.2024	56	304,8	566,8	2163	3,55	69	65	161,10	40,87	40,77	8,3		43,1	40,6						
9			28.03.2024	56	304,4	572,2	2137	4,05	70	73	162,06	41	40,95	9,5		43,8	45,6						
1	S9v	01.02.2024	08.02.2024	7	301,8	569,4	2128	2,45	19	19	161,11	40,96	41,08	5,7	5,4	11,9	11,9	13,5	2130,39			5,4	13,5
2			08.02.2024	7	306,6	575,6	2140	2,3	20	25	161,54	40,66	40,44	5,4		12,5	15,6						
3			08.02.2024	7	301,8	570,4	2124	2,2	23	24	161,41	40,56	42,08	5,2		14,4	15,0						

Katsekeha tähis	Retsept	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Purustav jõud, kN			Proovikeha mõõtmed			Paindetugevus, MPa		Survetugevus, MPa			Keskmine tihedus kg/m ³	Paindetugevus, MPa	Survetugevus, MPa
								Paindel	Survel 1	Survel 2	pikkus	laius	kõrgus	Üksik	Keskmine	Üksik 1	Üksik 2	Keskmine			
4			29.02.2024	28	305,4	574,4	2135	3,75	53,5	55	160,56	41,74	41,64	8,8	8,5	33,4	34,4	35,2	2128,60	8,5	35,2
5			29.02.2024	28	303,2	572,8	2125	3,725	57	59	161,16	40,52	40,68	8,7		35,6	36,9				
6			29.02.2024	28	301,5	569,3	2126	3,45	56	57	160,84	40,37	40,12	8,1		35,0	35,6				
7			28.03.2024	56	311,8	580	2163	4,1	68	65	160	43,44	43,4	9,6	9,1	42,5	40,6	42,3	2163,30	8,9	42,3
8			28.03.2024	56	315,8	586,4	2167	3,55	67	70	161,67	42,88	42	8,3		41,9	43,8				
9			28.03.2024	56	309,8	576,8	2160	3,7	68	68	162,34	43,57	44,11	8,7		42,5	42,5				
1	S10E	04.02.2024	03.03.2024	28	330,2	597,6	2235	4,6	86	87	160,53	40,51	40,44	10,8	10,2	53,8	54,4	57,8	2235,88	10,2	57,8
2			03.03.2024	28	326,6	591	2235	4,3	91	94,5	160,19	41,04	40,12	10,1		56,9	59,1				
3			03.03.2024	28	332,4	601	2238	4,175	96,5	99,5	160,2	40,11	40,15	9,8		60,3	62,2				

Lisa 2 Paindetugevuse katsekehade andmed [31]

LISA 3 NAKKEGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL

Katsekeha number	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Enne kuivatust, g	Pärast kuivatust, g	Purustav jõud, N	Pinge purunemisel, MPa	Keskmine
42	S2V	08.01.2024	15.01.2024	7	2151	1970		katse ebaõnnestus	2,1
43			15.01.2024	7	2118	1935		2,03	
44			15.01.2024	7	2136	1956		2,26	
48.8			05.02.2024	28	2085	1934,4		2,36	2,8
46.4			05.02.2024	28	2167,6	2019,2		2,88	
71			05.02.2024	28	2129,8	1976,6		3,08	
53.7			04.03.2024	56	2058			2,67	2,6
49.5			04.03.2024	56	2037,2			2,52	
49.3			04.03.2024	56	2039,4			2,48	
4			S3E	29.01.2024	05.02.2024	7	2208,8	2045,6	
5	05.02.2024	7			2205,8	2044,8		x	
6	05.02.2024	7			2189,2	2038,2		1,87	
13	26.02.2024	28			2184,8			0,60	1,5
14	26.02.2024	28			2195,5			2,05	
15	26.02.2024	28			2160			1,91	
19	25.03.2024	56			2163		5673	2,89	2,2
20	25.03.2024	56			2167,4		2281	1,16	
21	25.03.2024	56			2208,4		5223	2,66	
4	S3V	29.01.2024			05.02.2024	7	2198,4	2027,8	
5			05.02.2024	7	2223	2060		2,32	
6			05.02.2024	7	2209,4	2060,6		2,25	
13			26.02.2024	28	2207,6			1,78	1,8
14			26.02.2024	28	2145,3			1,68	

Katsekeha number	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Enne kuivatust, g	Pärast kuivatust, g	Purustav jõud, N	Pinge purunemisel, MPa	Keskmine		
15			26.02.2024	28	2199,1			1,91			
19			25.03.2024	56	2237		2997	1,53			
20			25.03.2024	56	2221,8		4272	2,18	2,0		
21			25.03.2024	56	2186		4582	2,33			
4	S4E	31.01.2024	07.02.2024	7	2118,6			2,24	2,1		
5			07.02.2024	7	2089,2			1,97			
6			07.02.2024	7	2177,4			2,17			
13					28.02.2024	28	2137,4			1,33	1,6
14					28.02.2024	28	2198,8			1,91	
15					28.02.2024	28	2140,8			1,42	
19					27.03.2024	56	2143,8		X	x	2,4
20					27.03.2024	56	2202		x	x	
21					27.03.2024	56	2137,2		4627	2,36	
4			S4V	31.01.2024	07.02.2024	7	2078,8			2,46	2,3
5	07.02.2024	7			2127			2,24			
6	07.02.2024	7			2070,8			2,12			
13					28.02.2024	28	2198,4			2,10	1,9
14					28.02.2024	28	2220,4			1,60	
15					28.02.2024	28	2124,6			2,04	
19					27.03.2024	56	2128,6		x	x	2,9
20					27.03.2024	56	2209,6		X	x	
21					27.03.2024	56	2142,8		5605	2,85	
4	S5E	03.02.2024	10.02.2024	7	2169,2			2,11	1,9		
5			10.02.2024	7				2,00			
6			10.02.2024	7				1,67			
13					02.03.2024	28	2187,4			2,46	2,6
14					02.03.2024	28	2197,6			2,76	
15					02.03.2024	28	2213,2			2,72	
19					30.03.2024	56	2156,8		x	x	2,7
20					30.03.2024	56	2192,8		4064	2,07	
21					30.03.2024	56	2197,6		6387	3,25	
4	S5V	03.02.2024	10.02.2024	7	2078,8			2,16	2,0		
5			10.02.2024	7	2187,8			2,07			
6			10.02.2024	7	2143,6			1,80			
13					02.03.2024	28	2205		x	x	1,7
14					02.03.2024	28	2222,8			1,61	
15					02.03.2024	28	2168			1,83	
19					30.03.2024	56	2189,6		5980	3,05	2,8
20					30.03.2024	56	2115		5443	2,77	
21					30.03.2024	56	2104,8		4924	2,51	
4	S6E	04.02.2024	11.02.2024	7	2085,2			1,22	1,6		
5			11.02.2024	7	2084			1,85			

Katsekeha number	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Enne kuivatust, g	Pärast kuivatust, g	Purustav jõud, N	Pinge purunemisel, MPa	Keskmine
6			11.02.2024	7	2099,6			1,78	1,6
13			03.03.2024	28	2205,6			1,21	
14			03.03.2024	28	2149			2,01	
15			03.03.2024	28	2210,4			x	
19			31.03.2024	56	2126,2		4021	2,05	
20			31.03.2024	56	2153		x	x	
21			31.03.2024	56	2132		3059	1,56	1,8
4	S6E2	31.01.2024	07.02.2024	7	2084,6			2,25	1,8
5			07.02.2024	7	2041,6			2,14	
6			07.02.2024	7	2050,8			1,05	
13			28.02.2024	28	2084,6			1,34	1,5
14			28.02.2024	28	2047,6			1,79	
15			28.02.2024	28	2107,4			1,31	
19			27.03.2024	56	2125,6		x	x	
20			27.03.2024	56	2150,4		3366	1,71	1,8
21			27.03.2024	56	2073,2		3794	1,93	
4	S7E2	31.01.2024	07.02.2024	7	2011,6			1,96	1,8
5			07.02.2024	7	2019,6			1,59	
6			07.02.2024	7	2097,2			1,88	
13			28.02.2024	28	2086,6			1,70	1,7
14			28.02.2024	28	2075,2			1,68	
15			28.02.2024	28	2157,4			1,77	
19			27.03.2024	56	2134		5006	2,55	2,4
20			27.03.2024	56	2090,8		4033	2,05	
21			27.03.2024	56	2133,8		5085	2,59	
4	S8E2	01.02.2024	08.02.2024	7	2095,6			1,82	1,8
5			08.02.2024	7	2078			1,75	
6			08.02.2024	7	2079,6			1,68	
13			29.02.2024	28	2075			1,30	1,2
14			29.02.2024	28	2161,5			0,75	
15			29.02.2024	28	2128,9			1,59	
19			28.03.2024	56	2043,6		3507	1,79	1,7
20			28.03.2024	56	2097,6		3362	1,71	
21			28.03.2024	56	2062,6				
4	S8V	01.02.2024	08.02.2024	7	2042,4			1,88	2,0
5			08.02.2024	7	2081,4			2,16	
6			08.02.2024	7	2084			1,99	
13			29.02.2024	28	2147,7			0,50	1,1
14			29.02.2024	28	2143,3			1,02	
15			29.02.2024	28	2149			1,74	
19			28.03.2024	56	2082		2074	1,06	1,3
20			28.03.2024	56	2121,6		2849	1,45	

Katsekeha number	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Enne kuivatust, g	Pärast kuivatust, g	Purustav jõud, N	Pinge purunemisel, MPa	Keskmine	
21			28.03.2024	56	2098,8		x	x		
4	S9E2	01.02.2024	08.02.2024	7	2007,6			1,78	1,8	
5			08.02.2024	7	1992,2			1,79		
6			08.02.2024	7	2066,6			1,75		
13			29.02.2024	28	2062,8			2,27	1,9	
14			29.02.2024	28	2081,7			1,96		
15			29.02.2024	28	2051,8			1,61		
19			28.03.2024	56	2094,2			x	x	1,5
20			28.03.2024	56	2076,4		3744	1,91		
21			28.03.2024	56	2088,6		2073	1,06		
4			S9V	01.02.2024	08.02.2024	7	2072,6			1,61
5	08.02.2024	7			2066,8			1,96		
6	08.02.2024	7			2084,6			1,62		
13	29.02.2024	28			2061,9			1,68	1,3	
14	29.02.2024	28			2085,2			1,23		
15	29.02.2024	28			2053,3			0,90		
19	28.03.2024	56			2054,2			3673	1,87	1,7
20	28.03.2024	56			2093,2			3092	1,57	
21	28.03.2024	56			2062,4			X	x	

Lisa 3 Nakketugevuse katsekehade andmed [31]

LISA 4 TÖMBETUGEVUSE KATSEKEHADE ANDMETE TABEL

Katsekeha number	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Laius, mm	Paksus, mm	Pindala, mm ²	Purustav jõud, N	Purustav tõmbepinge, MPa	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Keskmine tõmbetugevus, MPa	Keskmine tihedus
1	S2v	08.01.2024	05.02.2024	28	23,47	24,55	576,19	1 900	3,30	87,2	160,23	2194	3,6	2199
2			05.02.2024	28	23,29	22,8	531,01	2000	3,77	81,6	150,22	2189		
3			05.02.2024	28	23,5	23,8	559,30	2 080	3,72	86	156,77	2215		
4			04.03.2024	56	23,74	24,07	571,42	1 890	3,31	86,6	156,8	2234	3,4	2225
5			04.03.2024	56	23,84	23,58	562,15	1920	3,42	84,8	153,8	2229		
6			04.03.2024	56	23,85	23,56	561,91	1 900	3,38	85,2	155,4	2214		
1	S3e	29.01.2024	26.02.2024	28	29,8	23,21	691,66	1 820	2,63	75,2	144,4	2087	2,8	2078
2			26.02.2024	28	23,33	22,9	534,26	1660	3,11	73,6	142,2	2073		
3			26.02.2024	28	27,24	23,44	638,51	1 760	2,76	75,2	145,2	2074		
4			25.03.2024	56	23,42	24,34	570,04	2 020	3,54	75,5	146,4	2065	3,7	2066
5			25.03.2024	56	23,28	24,75	576,18	2152	3,73	75,2	145,9	2064		
6			25.03.2024	56	23,15	24,64	570,42	2 162	3,79	76,1	147,3	2069		
1	S3v	29.01.2024	26.02.2024	28	21,75	24,05	523,09	1 810	3,46	65	129,8	2003	3,8	1999
2			26.02.2024	28	22,68	23,25	527,31	2060	3,91	64,4	129	1997		
3			26.02.2024	28	23,31	23,36	544,52	2 190	4,02	70,4	141	1997		

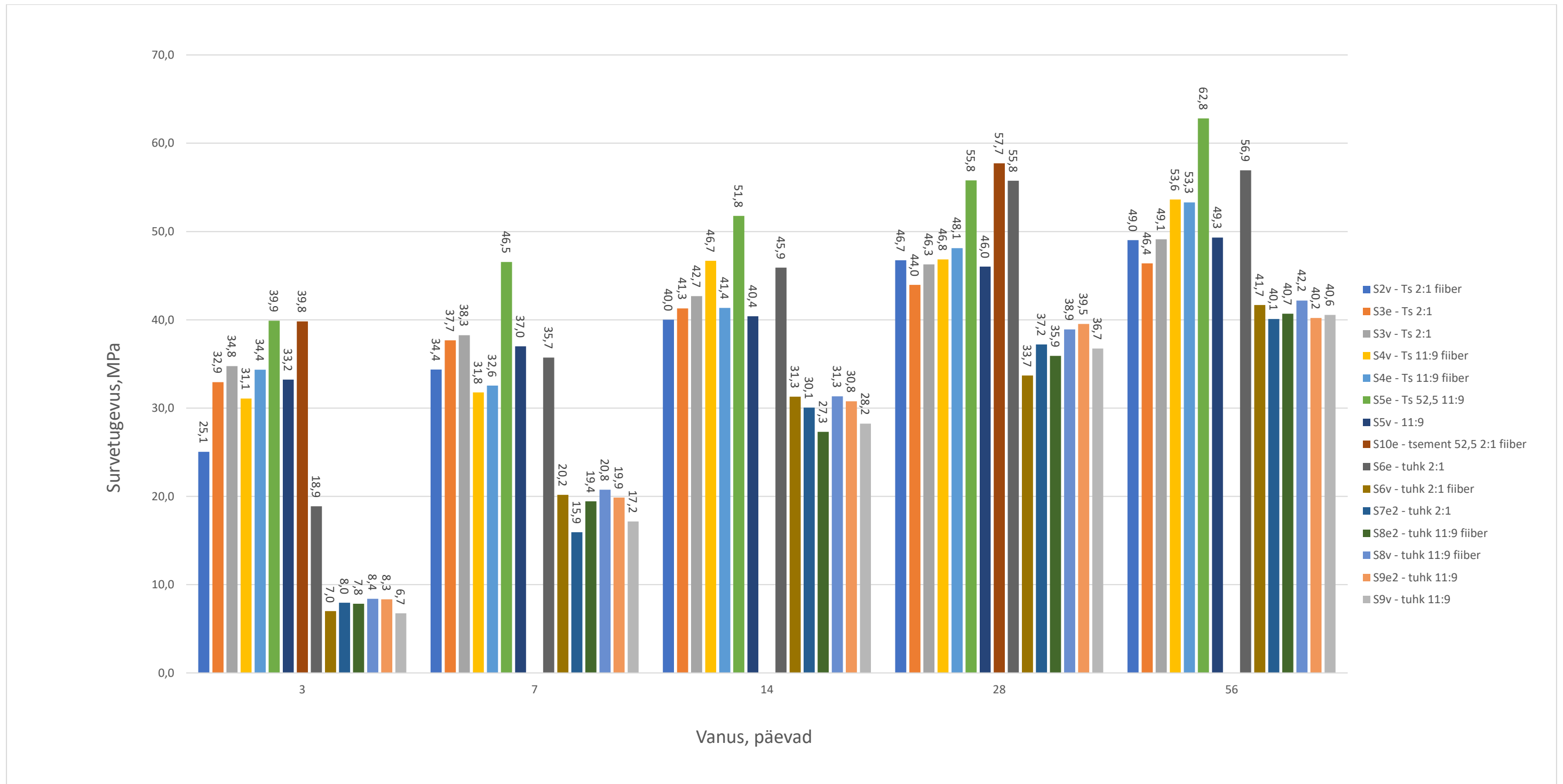
Katsekeha number	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Laius, mm	Paksus, mm	Pindala, mm ²	Purustav jõud, N	Purustav tõmbepinge, MPa	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Keskmine tõmbetugevus, MPa	Keskmine tihedus
4			25.03.2024	56	23,75	23,74	563,83	2 215	3,93	74,6	147,7	2021	4,0	2022
5			25.03.2024	56	23,22	24,48	568,43	2293	4,03	73,8	146,6	2014		
6			25.03.2024	56	22,59	23,52	531,32	2 169	4,08	75,6	148,8	2033		
1	S4e	31.01.2024	28.02.2024	28	23,25	24,28	564,51	2 240	3,97	89,4	160,6	2256	4,2	2254
2			28.02.2024	28	23,96	24,13	578,15	2480	4,29	88,6	158,8	2262		
3			28.02.2024	28	23,49	25,14	590,54	2 530	4,28	89,6	161,6	2244		
4			27.03.2024	56	23,29	24,1	561,29	2 880	5,13	91	161,4	2293	4,8	2270
5			27.03.2024	56	23,45	24,25	568,66	2670	4,70	89,2	160	2260		
6			27.03.2024	56	23,82	23,78	566,44	2 590	4,57	87	156,2	2257		
1	S4v	31.01.2024	28.02.2024	28	23,08	24,67	569,38	1 890	3,32	84,8	152,2	2258	3,6	2252
2			28.02.2024	28	21,91	26,04	570,54	2160	3,79	84,6	152	2255		
3			28.02.2024	28	22,39	24,69	552,81	2 030	3,67	81,6	147,2	2244		
4			27.03.2024	56	27,19	25,44	691,71	2 250	3,25	88,8	160,4	2240	3,7	2244
5			27.03.2024	56	22,73	25,62	582,34	1750	3,01	83,6	151,2	2237		
6			27.03.2024	56	22,7	24,72	561,14	2 680	4,78	82,6	148,4	2255		
1	S5e	03.02.2024	02.03.2024	28	27,3	24,66	673,22	2 580	3,83	85,8	153,4	2269	3,7	2273
2			02.03.2024	28	24,43	24,54	599,51	2670	4,45	84,4	150,6	2275		
3			02.03.2024	28	19	24,26	460,94	1 230	2,67	79,6	142	2276		
4			30.03.2024	56	21,22	24,76	525,41	2 120	4,03	78,4	142,2	2229	3,8	2237
5			30.03.2024	56	24,88	24,49	609,31	2260	3,71	89	160,2	2250		
6			30.03.2024	56	20,36	24,16	491,90	1 790	3,64	77,4	140,2	2232		
1	S5v	03.02.2024	02.03.2024	28	24,54	26,07	639,76	1 980	3,09	93,2	167,4	2256	3,7	2254
2			02.03.2024	28	23,78	24,97	593,79	2130	3,59	90,2	162	2256		
3			02.03.2024	28	24,19	25,47	616,12	2 630	4,27	92,4	166,4	2249		
4			30.03.2024	56	23,35	24,46	571,14	2 580	4,52	89,4	161,8	2235	3,7	2227
5			30.03.2024	56	24,33	25,18	612,63	1930	3,15	91,2	165,4	2229		
6			30.03.2024	56	23,27	25,28	588,27	2 080	3,54	90,4	164,6	2218		
1	S6e	04.02.2024	03.03.2024	28	23,49	24	563,76	1 640	2,91	80	148,6	2166	3,0	2165
2			03.03.2024	28	23,86	23,7	565,48	1540	2,72	80,2	149	2166		
3			03.03.2024	28	23,74	23,23	551,48	1 850	3,35	79,4	147,6	2164		
4			31.03.2024	56	23,38	23,76	555,51	2 360	4,25	84,6	153,6	2226	3,3	2182
5			31.03.2024	56	23,45	24,23	568,19	2310	4,07	80,8	150,2	2164		
6			31.03.2024	56	23,39	23,4	547,33	942	1,72	79,6	148,4	2157		
1	S6e2	31.01.2024	28.02.2024	28	24,41	26,1	637,10	1 560	2,45	85,2	158,2	2167	2,1	2163
2			28.02.2024	28	24,45	24,4	596,58	1060	1,78	86,4	160,8	2161		
3			28.02.2024	28	23,02	26,6	612,33	1 280	2,09	83,2	154,8	2162		
4			27.03.2024	56	23,57	27,57	649,82	2 340	3,60	86,2	160,4	2162	3,4	2162
5			27.03.2024	56	23,97	26,05	624,42	2030	3,25	80,4	149,8	2159		
6			27.03.2024	56	26,35	25,63	675,35	2 240	3,32	86,2	160,2	2165		
1	S7e2	31.01.2024	28.02.2024	28	24,44	24,4	596,34	1 550	2,60	79,2	146,2	2182	2,4	2180
2			28.02.2024	28	24,39	24,81	605,12	1380	2,28	83,8	154,6	2184		
3			28.02.2024	28	24,74	25,47	630,13	1 520	2,41	82,4	152,6	2174		
4			27.03.2024	56	22,84	24,49	559,35	2 370	4,24	78,8	145,3	2185	4,1	2183
5			27.03.2024	56	23,92	24,85	594,41	2510	4,22	78,6	144,8	2187		

Katsekeha number	Katsekeha tähis	Valmistatud	Katsetatud	Vanus	Laius, mm	Paksus, mm	Pindala, mm ²	Purustav jõud, N	Purustav tõmbepinge, MPa	Mass vees, g	Mass õhus, g	Märgtihedus	Keskmine tõmbetugevus, MPa	Keskmine tihedus
6			27.03.2024	56	22,42	24,88	557,81	2 160	3,87	77,4	143,2	2176		
1	S8e2	01.02.2024	29.02.2024	28	x	x		x	x	71,6	134	2147	2,2	2149
2			29.02.2024	28	23,75	24,65	585,44	888	1,52	83	155,4	2146		
3			29.02.2024	28	23,81	24,57	585,01	1 640	2,80	81,6	152,4	2153		
4			28.03.2024	56	24,19	25,53	617,57	2 170	3,51	83,2	159,2	2095	3,5	2128
5			28.03.2024	56	23,42	25,8	604,24	2260	3,74	85,2	159,8	2142		
6			28.03.2024	56	23,43	24,96	584,81	1 970	3,37	84	157,2	2148		
1	S8v	01.02.2024	29.02.2024	28	22,45	26,42	593,13	1 560	2,63	79,6	148,6	2154	2,5	2154
2			29.02.2024	28	21,76	26,36	573,59	1580	2,75	80,4	150	2155		
3			29.02.2024	28	26,73	25,86	691,24	1 450	2,10	84,8	158,4	2152		
4			28.03.2024	56	22,49	26,55	597,11	2 020	3,38	82,6	150	2226	3,6	2203
5			28.03.2024	56	22,53	25,98	585,33	1820	3,11	80,2	150,2	2146		
6			28.03.2024	56	23,34	23,87	557,13	2 330	4,18	79,2	143,2	2238		
1	S9e2	01.02.2024	29.02.2024	28	23,68	26,12	618,52	1 880	3,04	82,6	153,6	2163	2,7	2166
2			29.02.2024	28	19,64	26,93	528,91	1160	2,19	85,8	159,6	2163		
3			29.02.2024	28	22,88	27,1	620,05	1 710	2,76	83,5	154,8	2171		
4			28.03.2024	56	24,99	25,29	632,00	1 710	2,71	84,8	156	2191	3,2	2146
5			28.03.2024	56	25,33	25,37	642,62	1970	3,07	85,4	160	2145		
6			28.03.2024	56	24,27	24,8	601,90	2 240	3,72	78	148,8	2102		
1	S9v	01.02.2024	29.02.2024	28	24,03	24,17	580,81	2 130	3,67	73,2	136,2	2162	3,1	2155
2			29.02.2024	28	21,91	25,03	548,41	1280	2,33	77,6	145,4	2145		
3			29.02.2024	28	22,71	24,05	546,18	1 740	3,19	73	136	2159		
4			28.03.2024	56	24,63	25,28	622,65	1 300	2,09	82,2	148,2	2245	2,7	2223
5			28.03.2024	56	21,54	25,25	543,89	1680	3,09	79,2	142,8	2245		
6			28.03.2024	56	25,06	24,73	619,73	1 790	2,89	82,2	152	2178		

Lisa 4 Tõmbetugevuse katsekehade andmed [31]

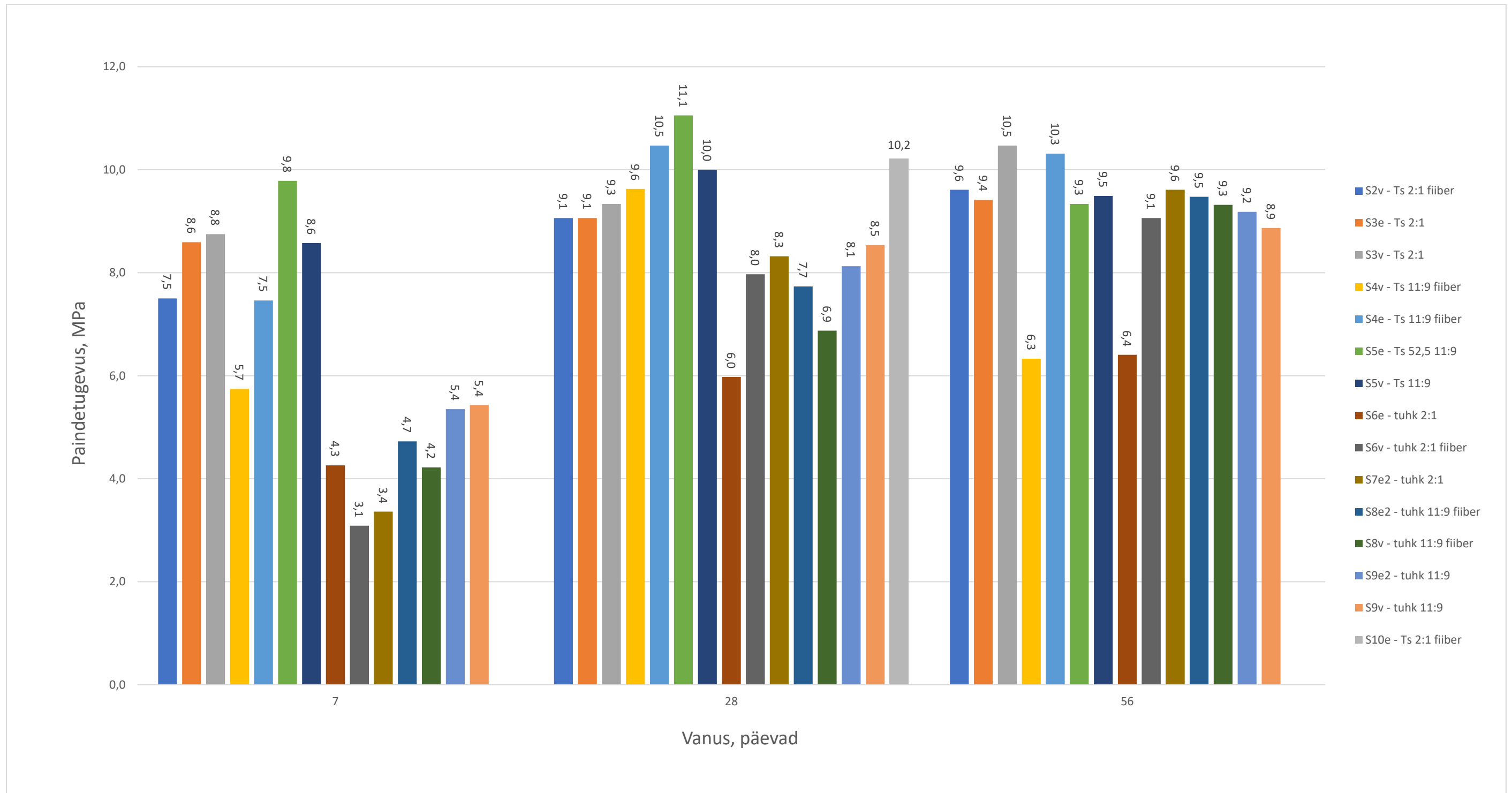
GRAAFILINE OSA

GRAAFIK 1 SURVETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK



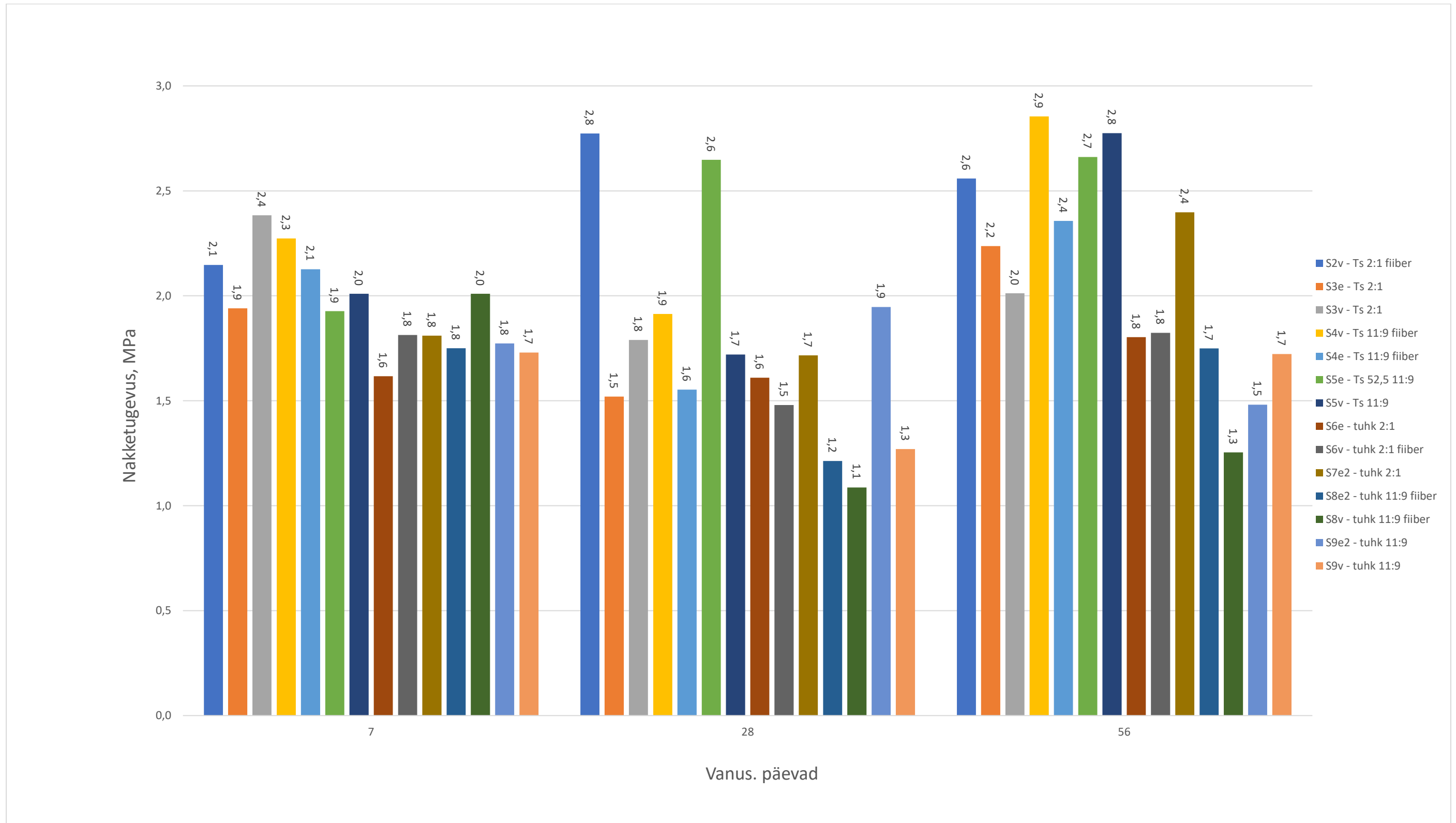
Graafik 1 survetugevuse katsekehade andmed [31]

GRAAFIK 2 PAINDETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK



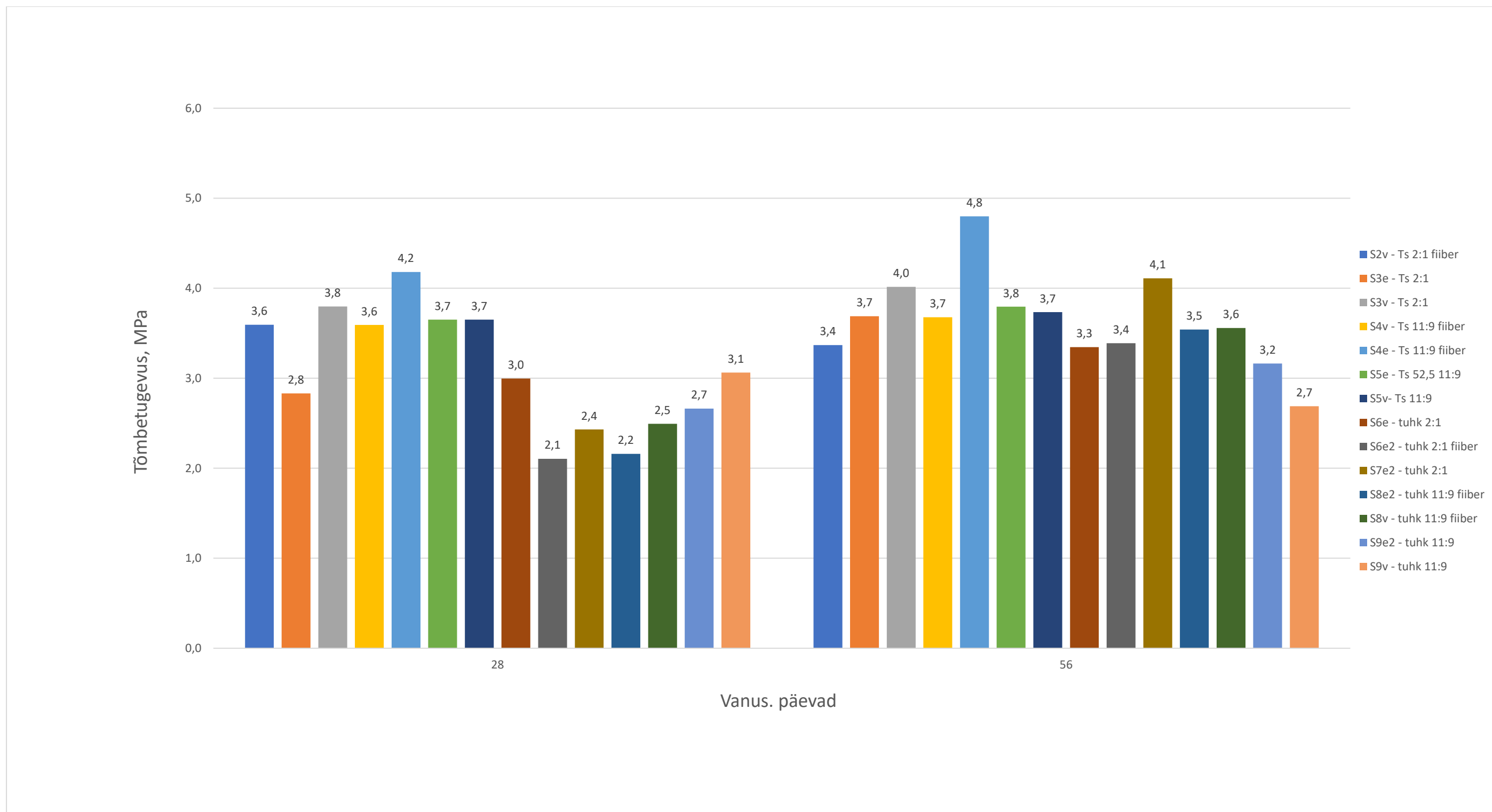
Graafik 2 Paindetugevuse katsekehade andmed [31]

GRAAFIK 3 NAKKETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK



Graafik 3 Nakketugevuse katsekehade andmed [31]

GRAAFIK 4 TÕMBETUGEVUSE TULEMUSTE KOONDGRAAFIK



Graafik 4 Tõmbetugevuse katsekehade andmed [31]