



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

**PAISUTATUD KLAASI TÄIDISEGA
KANAPIBETOONI JA LUBIKROHVI SOOJUS- JA
NIISKUSTEHNILISTE OMADUSTE MÄÄRAMINE**

**DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND
HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF HEMPCRETE AND
LIME PLASTER WITH EXPANDED GLASS FILLING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaarin Kivil

Üliõpilaskood: EAEI177581

Juhendajad: Aime Ruus
Ernst Tungal

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kaarin Kivil,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Paisutatud klaasi täidisega kanepibetooni ja lubikrohvi soojus- ja niiskustehniliste omaduste määramine“, „Determination of thermal conductivity and hygrothermal performance of hempcrete and lime plaster with expanded glass filling“, mille juhendaja on Aime Ruus

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti

Tartu kolledž
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kaarin Kivil, EAEI177581

Õppekava, peeriala: EAEI02/17 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendaja(d): Kaasprofessor (direktor), Aime Ruus, +372 5340 2823,
dotsent, Ernst Tungel, +372 518 4497

Lõputöö teema:

„Paisutatud klaasi täidisega kanepibetooni ja lubikrohvi soojus- ja niiskustehniliste omaduste määramine“

„Determination of thermal conductivity and hygrothermal performance of hempcrete and lime plaster with expanded glass filling“

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida paisutatud klaasgraanulite mõju loodusliku hüdraulilise sideainega materjalide niiskustehnilisi omadusi
2. Uurida paisutatud klaasgraanulite mõju soojuserijuhtivusele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade	10.04.2023
2.	Katsete teostus	1.05.2023
3.	Tulemuste analüüs ja kokkuvõte	12.05.2023

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "19." mai 2023. a

Üliõpilane: Kaarin Kivil ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Aime Ruus ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Ernst Tungel ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

....

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	8
1.1 Hoone soojuslik ja niiskustehniline toimivus.....	8
1.2 Tööstuskanep	9
1.2.1 Kanepibetoon	10
1.2.2 Kanepibetooni niiskus- ja soojustehnilised omadused.....	13
1.3 Paisutatud klaas.....	15
1.4 Lubi.....	18
2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED	21
3. MATERJAL JA METOODIKA	22
3.1 Katsekehad ja karboniseerumiseprotsess	22
3.2 Katsete meetodika.....	27
3.2.1 Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine	27
3.2.2 Hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine	29
3.2.3 Veeauru läbilaskeomaduste määramine	31
3.2.4 Materjalide soojuserijuhtivuse määramine	32
4. TULEMUSED.....	34
4.1 Katsekehade tihedused	34
4.2 Kapillaarse veeimavus koefitsient	36
4.3 Hügrokoopsete sorptsiooniomadused.....	39
4.4 Veeauru läbilaskeomadused.....	43
4.5 Soojuserijuhtivus	45
5. ANALÜÜS	48
6. KOKKUVÕTE	53
7. SUMMARY.....	54
8. KASUTATUD KIRJANDUS	55
LISAD	60

Lisa 1 Silindrikujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi kaaluandmed	60
Lisa 2 Prismakujuliste kangide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed	62
Lisa 3 Plaadikujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi kaaluandmed	64
Lisa 4 Süsihappegaasi manustamine katsemajas	66
Lisa 5 Silindrikujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi pildid	67
Lisa 6 Silindrikujuliste katsekehade pildid 12. jaanuaril.....	70
Lisa 7 Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramise katse kaaluandmed	71
Lisa 8 t-testi näide veeimavuse segu gruppide A ja B vahel.....	72
Lisa 9 Adsorptsiooni katse kaaluandmed.....	73
Lisa 10 Desorptsiooni katse kaaluandmed.....	75
Lisa 11 Veeauruläbivuse katse kaaluandmed	77

SISSEJUHATUS

Euroopa liidu uued nõuded hoonete energiatõhususele on loodud selleks, et vähendada heitgaaside kogust ja seejärel muuta keskkond loodussõbralikumaks. Lisaks on loodud riiklikud hoonete renoveerimisstrateegiad [1] selle eesmärgi täideviimiseks ning visioon on rajada heitevabasid hooneid. Euroopas arendavad erinevad tootjad ka ehitusmaterjale, mis oleksid loodussõbralikumad, ei reostaks keskkonda, säilitaks maavarasid ning mis sobiksid heitevabade hoonete ehitamiseks.

Käesolevas uurimistöös keskendutakse loodusliku hüdraulilise lubisideainega kanepibetooni ja lubikrohvi segudele, mille täiteks on kasutatud paisutatud klaasgraanuleid. Uuritakse nende segude niiskustehnilisi omadusi ning leitakse soojuserijuhtivus.

Kanepibetooni peetakse süsinikneutraalseks või isegi süsiniknegatiivseks [2], sest tootmise ajal kanepitaim neelab süsihappegaasi (CO_2), kanepibetooni tootmisel eraldab CO_2 -te, kuid lõpp produktina jällegi neelab CO_2 -te. Paisutatud klaasgraanulite tootmisel kasutatakse ära klaasijätmeid.

Töö koosneb teoreetilisest ja praktilisest osast. Teoreetilises osas antakse ülevaade kanepibetoonist, paisutatud klaasist ja lubjast kirjanduses ning varasemates uuringutes. Praktilises osas viidi läbi 4 katset: kapillaarse veeimavuse määramine, hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine, veeauru läbilaskeomaduste määramine ja soojuserijuhtivuse määramine. Katseid viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži laboriruumides ning Tallinna Tehnikaülikooli Mäemajas.

Autor soovib tänada lõputöö koostamisel abiks olnud Marko Kikast ja Maksim Matti Saviukumaja OÜ-st, Mattias Põldaru, Jane Raametsa ja juhendajaid Aime Ruusi ja Ernst Tungelit.

Võtmesõnad: kanepibetoon, looduslik hüdrauliline lubi, paisutatud klaasgraanulid, magistritöö

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Hoone soojuslik ja niiskustehniline toimivus

Ehitusseadustiku määruses „Ehitisele esitatavad nõuded“ [3] on välja toodud nõuded eluruumi sisekliimale. Seal on välja toodud, et temperatuur peab olema optimaalne ja andma inimesele hubase soojatunde. Lisaks peab siseõhu niiskus olema vahemikus, mis väldib veeauru kondenseerumist ja ei tekita niiskuskahjustusi. Sellest tulenevalt peavad ka hoones kasutatud materjalid seda tagama.

Hoone sisekliimale on tähtis hoone soojapidavus ning selle tagamiseks kasutatud materjalid tarindis. Antud töös on käsitletud materjali soojusjuhtivust ning leitud katsetatavatele materjalidele soojuserijuhtivus λ (lambda). Soojuserijuhtivuse katse läbiviimiseks kasutati standardit EVS-EN 12667:2001 [4]. Soojuserijuhtivuse määramisel mõjutab seda materjali eri pooltel olev temperatuur, materjali tihedus, poorsus ja niiskus. [5]

Lisaks soojusjuhtivusele on tähtis ka hoone niiskustehniline toimivus. Selleks uuritakse materjalide hügrooskoopseid omadusi. Materjalide hügrooskoopsest toimivust saab määrata standardiga EVS-EN ISO 12571:2021 [6]. Inimesele parim suhteline õhuniiskus hoones võiks jääda 40-60% vahele. Selles vahemikus ei ole head tingimused hallistuste tekkeks ning ei levi õhus mürgiseid kemikaale. Suhteline õhuniiskus koos temperatuuriga mõjutab sisekliimat ning materjalid saavad sellele kaasa aidata kogudes endasse liigset niiskust ja seejärel kuivades vabastada niiskust. [7]

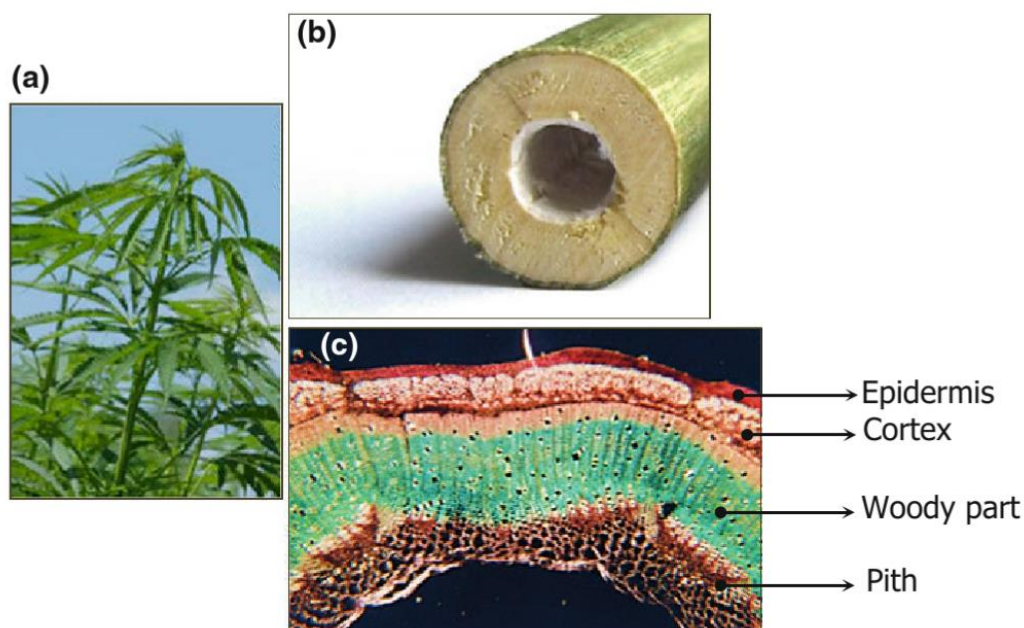
Lisaks materjali niiskumisele ja kuivamisele määratakse ka niiskustehnilise toimivuse hindamiseks kapillaarse veeimavuse koefitsient. Seda määratakse standardiga EVS-EN 1015-18:2005 [8]. Liigset kapillaarse vee imendumine määratakse, sest see võib põhjustada materjali füüsikalisi ja keemilisi muutusi. Lisaks võib see mõjutada hoone soojustõhusust. [9]

Niiskuse puhul tuleb jälgida ka materjalide veeauru läbivust ning veeauru osarõhku tarindit ümbritsevates keskkondades. Veeauru läbivust määratakse standardiga EVS-EN ISO 12572:2016 [10]. Veeaur liigub kõrgema rõhu poolt madalama rõhu poole. Tarindi ehitamisel peab jälgima, mis suunas veeaur liikuma hakkab. [5]

1.2 Tööstuskanep

Kanepisorte on sadu ja need jagunevad kolme alamrühma: *cannabis indica*, *cannabis sativa* ja *cannabis ruderalis* [11]. Tööstuskanepi all, mida nimetatakse inglise keeles *hemp* või *industrial hemp*, mõeldakse harilikku kanepi (*Cannabis sativa*) sorti [12]. Eestis on lubatud kasvatada kanepisorte, milles tetrahüdrokannaibooli (THC) sisaldus on kindlaks määratud Euroopa Liidu määrusega 1307/2013 [13], mis ütleb, et kanepisordi THC sisaldus ei tohi ületada 0,2%.

Harilik kanep on üheaastane taim, mis kasvab 1,5-4 meetri kõrguseks. Taime vars on õhuke ja seest õõnes. Olenevalt sordist ning kasvatustingimusest on varre läbimõõt 4-20 mm [2]. Taim kasvab neli kuud. Peale seda niidetakse varred maha ja jäetakse põllule seisma kuni varte niiskus on umbes 15%. Seejärel varred koristatakse ja eraldatakse puitunud osad kanepikiududest. [14]



Joonis 1.1 a) Kanepitaim b) Kanepi vars c) Mikrofoto kanepivarre ristlõikest [14]

Kanepitaimede vars koosneb erinevatest osadest (Joonis 1.1), millest ehitusmaterjalidena on tähtsamad kanepiluu (*woody part*) ja kanepikiud (*cortex*). Kanepikiud moodustavad peaaegu 10% varre läbimõõdust ning kanepiluu ehk puisem osa üle 85% ristlõikest. Kanepiluu on hea omadus imada ja säilitada endast vett. Ristlõiget vaadates moodustab ta pikki vart pikki kapillaare ja on väga poorne [15]. Kanepikiudusid kasutatakse kangastes ja tekstiilides, paberis, vaipades, kodusisustuses, ehitus- ja

isolatsioonimaterjalides, autoosades ja komposiitide valmistamisel. Kanepiluud kasutatakse ka loomade allapanus ja erinevate toorainete komponendina. Kanepiseemneid kasutatakse toiduainetööstuses, kosmeetikas ja ravimitööstuses [16]. Lisaks sellele, et kanepitaime on võimalik erinevatel viisidel kasutada on see kasulik ka põllukultuurina. Kanepi kasvatamine aitab põllumeestel puhastada maapinda, sest kanepitaimede vahelt ei kasva palju umbrohtu ja seetõttu ei vajata selle kasvatamisel kasutada pestitsiide ja suurel hulgal väetisi [17].

Kanep kasvab erinevates muldades ja kliimas, eeldusel, et mulla pH on 6,5 või kõrgem ehk neutraalne või aluseline. Kanepitaim on kasulik ka mullale, sest taim juurdub sügavuti ning lõhub ka alumisi mullakihte. Seda kasvatavad põllumehed ka tihti vahekultuurina, sest see kasvab kiiresti ning varjab päikest. Seetõttu ei saa sellel põllul kasvada palju umbrohtu ning ei pea kasutama taimekaitsevahendeid. [2]

Kanepi kasvatamine ning loodussõbralikult sellest toodetud materjalid on keskkonnan ja kasutajasõbralikud. Kanepist toodetud soojustusmaterjalid ei sisalda tervisele ohtlikke ühendeid ega saasta seeläbi ka toaõhku. Kasutades kanepikiude pole vaja neid töödelda koide ega putukate vastu, sest nad ei sisalda valku. [18]

1.2.1 Kanepibetoon

Kanepibetoon, inglise keeles ka kui *hemp concrete*, *hemcrete* või *hemp lime*, on kanepiluu, vee ja sideaine (lubi, tsement või savi) kokku segamisel saadud looduslik kergbetoon [19]. Kanepibetoonis on soovitatav kasutada sideainena lupja, sest lubja pH on kõrge ning oma olemuselt on see antimikroobne ja seenevastane [20]. Segu segades ümbritseb lubi igat kanepiluu tükki ja loob hea pinna, mis takistab hallituse teket. Katsetustena on sideainena kasutatud ka savi [21]. Ka antud uurimistöös kasutatakse katsekehade valmistamisel sideainena lupja.

Eestis pole kindlat juhendit ega standardeid kuidas kanepibetooni valmistada ning millise kvaliteediga kanepiluud kasutada. Prantsusmaal, kus kanepibetooni kasutamine on rohkem levinud, on välja töötatud juhised kanepikasvatajatele. Need reguleerivad, milline peab olema ehituses kasutatava kanepiluu kvaliteet. Ehitusmaterjalina kasutamiseks tuleb kanepiluu töödelda väikesteks tükkideks ning eemaldada kiud ning tolm. Kiudude eemaldamine on tähtis, sest need võivad imada rohkem vett ja mõjutada segu tardumist. Tolmu eemaldamine on tähtis, sest tolm imab valmistamisprotsessis

rohkem vett ja rikub ära sideaine toimimise. See võib mõjutada terve seina terviklikku tugevust. [2]

Tom Woolley on oma raamatus [17] välja toonud, et kanepibetooni tihedus võiks jääda 320-350 kg/m³ kohta, kuid vähendades lubja kogust võib tihedus langeda 250 kg/m³ kohta. Siiski on seal soovitatud, et parima tugevuse, soojusmassi ja isolatsiooni jaoks oleks tihedus 320 kg/m³. Lisaks tihedusele on tähtis kasutada õiget tüüpi kanepiluid. Selleks on kanepiluu, mille osade pikkused jäävad vahemikku 10-25 mm ning oleks tolmu ja kiudude vaba [17].

Kasutamisiisid

Kanepibetooni segu segatakse kokku kohapeal ning vastavalt edasisele paigaldusele, kas asetatakse karkassi vahele, valmistatakse neist plokid või paneelid, paigaldatakse karkassi vahele pihustades või kantakse seinale krohvina [17]. Kanepibetooni kasutatakse seintes, põrandal või katusel, jälgides, et tegemist on mitte kandva materjaliga [2].

Kohapeal paigaldatud kanepibetoon segatakse kokku platsil. Paigaldusprotsess tuleb hoolikalt läbi mõelda, et tagada segu kvaliteet ja soovitud omadused. Kõigepealt segatakse komponendid segistis või ämbrites kokku. Seejärel transporditakse soovitud kohta ning paigaldatakse raketiste vahele käsitsi. Kohapeal kokku segatud ja paigaldatud kanepibetooni eeliseks on võime moodustada monoliitne sein. [2]



Joonis 1.2 Pihustamismeetodiga kanepibetooni paigaldamine [22]

Pihustamismeetodiga paigaldamiseks on masin, millest tulevad kõik kolm komponenti eraldi voolikutest ja pihusti otsas segunevad. Pihustatakse vastu pinda, mis on osa seina konstruktsiooni ehk pole ajutine raketis (Joonis 1.2). Segu pihustatakse peale kihtide kaupa ehk järk-järgult kasvatatakse sein vajaliku paksuseni. [2]

Kanepibetoonist valmistatakse ka kanepiplokke ning -paneele. Mõlemaid valmistatakse tehastes ja tarnitakse objektile. Niimoodi kiirendatakse ehitusprotsessi tardumise ja kivinemise arvelt. Kanepipaneelid koosnevad puitkarkassist ja on täidetud kanepibetooniga. [20]

Viimistlemine

Kanepibetoonseina ei tohi jätta viimistlemata, eriti just väljastpoolt [17]. Viimistlusviisid jagunevad kahte kategooriasse:

- Krohvid – lubjapõhised, savi- või kipsipõhised
- Katteplaadid – magnesiitplaat, kipsplaat, puit, metall, komposiitplaadid, telliskivi või kivi, looduslikust materjalist toodetud plaadid [20].

Keskkonnasõbralik

Kanepibetoon, kus on kasutatud lubjapõhist sideainet suudab siduda süsinikdioksiidi (CO₂). Boskobic jt leidsid hiljutises kanepibetooni seinakonstruktsiooni elutsükli hindamise uuringus [23], et kanepibetooni elutsükli jooksul võib see jääda süsinikneutraalseks, kus CO₂ sidumistegur on 0,135 kgCO₂eq. Antud uurimises uuriti ka enim optimistlikku ja pessimistlikku verisooni, mille tulemused olid vastavalt -9,696 kgCO₂eq ja 10,165 kgCO₂eq. Lisaks uuriti kanepibetooni eluea lõpu stsenaariume, kus leiti, et kanepibetoon võib eluea lõpus vabastada kogu tootmisajal kogutud CO₂ koguse. Kuna pole täpseid andmeid, kuidas kanepibetooni eluea lõpus lagundatakse, siis need tulemused on ainult arvutuslikud ja tuleb viia läbi täiendavaid katseid. Välja tuleks ka tuua, et antud uurimuses oli sideainena arvestatud Serbias toodetud sideainet, kus 75% oli hüdraatunud lubi (CL90S), 15% looduslikku hüdraulilist lupja (NHL5) ja 10% metakaoliini.

Akustika

Kuna kanepibetoon on poorne materjal, siis on sellel ka akustilised omadused [2]. Akustilisi omadusi mõjutavad erinevad tegurid: kasutatud kanepitüüp ja selle osakeste suurused, täpne sideaine, komponentide ja vee suhe ning materjalide segamise ja paigaldamise tehnika [2].

Kinnane jt. on oma uurimistöös [24] katsetanud erinevate sideainetega kanepibetooni heli neeldumise võimet ning välja toonud, et üldiselt on kanepibetoonil head heli neeldumise võime. Välja on toodud ka, et helineeldumistegurit mõjutab tugevalt materjali paksus ning katse läbiviimisel kasutatud sagedust. Selle tõttu on keeruline erinevate materjalide helineeldumistegureid võrrelda. Kanepibetooni puhul on välja toodud, et helineeldumise tegurit mõjutavad rohkem sideaine keemiline koostis kui materjali tihedus ja poorsus. Lisaks on välja toodud, et kui kanepibetooni pealt krohvida, siis väheneb pinna poorsus ning leiti, et sel puhul väheneb ka heli neeldumisvõime.

Tulekindlus

Kanepibetooni tulekindluse kohta ei leidu palju ametlikke katsetusi. 2015. aastal on QAI Laboratories viinud läbi Kanadas tulekindluse katse „*Just BioFiber Structural Solutions*“ firma poolt toodetud kanepibetoonplokkile [25]. Katses leiti, et kaustatud kanepibetooniplokk pidas tulele vastu 68 minutit.

Lisaks on 2014. aastal Lubo Gregor katsetanud oma uurimustöö [26] käigus kanepibetooni Austraalia standardi AS1530.4 järgi. Uurimuses leiti, et kanepibetooni tulekindluses mängivad rolli kanepibetoonist sein paksus ning selle tihedus. Lisaks toodi välja, et lähtepunktiks võiks olla 360 mm paksune sein ning viimistluse puhul võib tulekindlus tõusta kui kasutada savikrohvi või magneesiumoksiidi plaati.

Lisaks on tulekindlust uuritud ka erinevate sideainete ja tiheduse kombinatsioonidega kanepibetooni [27].

1.2.2 Kanepibetooni niiskus- ja soojustehnilised omadused

Kanepibetooni iseloomustab madal puistetihedus, kõrge poorsus, madal soojusjuhtivus, head akustilised omadused ning kõrge tulepüsivus [19].

Tom Woolley toob oma raamatus „*Natural building techniques: a guide to ecological methods and materials*“ [17] välja toonud, et kui kanepibetoonist sein on väliselt hästi viimistletud, siis pole teada juhtumeid, et niiskus oleks läbi seina tunginud. Juhul kui on olnud probleeme, siis need olid tingitud valede materjalide kasutamisest. Lisaks toob ta välja, et kanepibetoon on hea isolatsioonina ning sellel on väga head hügrokoopse

sorptsiooni omadused. Sein suudab hästi reguleerida ruumi õhuniiskust ning materjali enda niiskust.

Kanepibetooni kasutamise head näitajad [17]:

- Soojusmugavus – heale niiskuse reguleerimise võimele tunnevad inimesed end mugavalt ega vaja liigselt kütet juurde lisada
- Kanepibetoon hoiab ühtlast sisetemperatuuri ja kuuma ilmaga ei tohiks vajada jahutamist
- Kanepibetoonil on suur soojusmassi eelis, samas ka hea isolatsioonivõime.
- Kanepibetooni kasutades on soojakadu aeglane ja see hoiab hoonet soojana

Tabelis 1.1 on välja toodud viies erinevas uurimistöös leitud/kasutatud kanepibetooni soojus- ja niiskustehnilised andmed.

Tabel 1.1 Erinevatest allikatest leitud tulemused

Referents	Koostis	Kuiv-tihedus kg/m ³	Vee imavuse koefitsient, kg/(m ² *min ^{0,5})	Difusiooni- takistustegur, μ	Adsorptsioon 75%, %	Soojuseri- juhtivused , W/mK
Koosapoeg [28]	Jäme kanepiluu, õhklubi karboniseeritud	245-286	1,45	4,4	7	-
	Peen kanepiluu, õhklubi karboniseeritud	362-447	1,9	3,5	5,4	-
Pappel [29]	Kanepiluu, kustutatud lubi, tsement	570,2/ 413,2	-	-	7,94	0,087
	Kanepiluu, savi	588/ 513,2	-	-	4,29	0,11
Anslan [30]	Kanepiluu, kustutatud lubi	307,5	-	-	-	0,0622
	Kanepiluu, kustutatud lubi, R1	917,2	-	-	-	0,1369
Brzycki [31]	Kanepiluu, sideaine: CL-90, metakaoliin ja tsement	497,9 ±5,25	-	-	-	0,108
Moletti [32]	Kanepiluu, DL85-30-S1	330		4,5		0,07

1.3 Paisutatud klaas

Klaasi kasutamine ehituses

Klaasi tooraineteks on liiv, sooda, lubjakivi, klaasimurd ning erinevad lisandid, mis muudavad klaasi värvust, läiget, kõvadust ning muid omadusi. Klaasi saadakse kui kuumutatakse klaasi toormaterjalide segu sulamistemperatuurini ning seejärel jahutatakse. Ehituses toodetakse erinevaid liike klaase ning neist toodetud ehitustooteid. Armeeritud kui ka armeerimata lehtklaasi või lameklaasi kasutatakse erinevates paksustes ja värvustes avatäidetena, välis- või siseviimistlusmaterjalina. Vaheseinte ehitamiseks klaasplokke. Veel toodetakse ka klaaskiudtooteid: klaasvatt, -kiud, -riie. [33]

Soojustus- ja isolatsioonimaterjalide valmistamiseks toodetakse mullklaasi, tuntud ka kui vahtklaas. Mullklaasi tootmiseks kasutatakse purustatud utiliiklaasi, mille sulale massile (1400 °C) lisatakse gaasitekitajat. Tihti lisatakse ka juurde jahvatatud sütt, et moodustada kinniseid poore. See ei ima vett, ei sütti ega põle ning selle sulamistemperatuur on üle 500°C. Lisaks on mullklaas ka keemiliselt püsiv. [33]

Klaasijäätmed

Euroopa Liit on eesmärgiks võtnud, et alates 2025. aastat tuleb korduvkasutusele võtta vähemalt 55 protsenti kodumajapidamisest pärinevaid paberi-, metalli-, plasti- ja klaasijäätmeid ning võimaluse korral ka muudest allikatest pärit samalaadseid jäätmeid. [34]

2020. aastal tekkis Eestis klaasjäätmeid 12 284 tonni [35]. 2015. aastal läbiviidud ehitus- ja lammutusjäätmete käitlusnõuete mõju analüüsis [36] selgus, et aastatel 2013 ja 2014 läks klaasjäätmeid taaskasutusse väga vähesel määral ning see osa, mis läks taaskasutamiseks, kasutati soojustusmaterjali tootmiseks. Lisaks selgus, et lehtklaas läheb peamiselt Soome ning pudeliklaas osaliselt Järvakanti ja osaliselt Poola. Eesti on võtnud ka eesmärgi, et pakenditootjad võtaksid 2025. aastaks taaskasutusse vähemalt 70% klaasi ning aastaks 2030 75% klaasijäätmeid [37].

Paisutatud klaas

Paisutatud klaasgraanulid, inglise keeles *expanded glass granules/beads* või *expanded foamglass granules*, on toodetud taaskasutades klaasijäätmeid [38]. (Joonis 1.3)



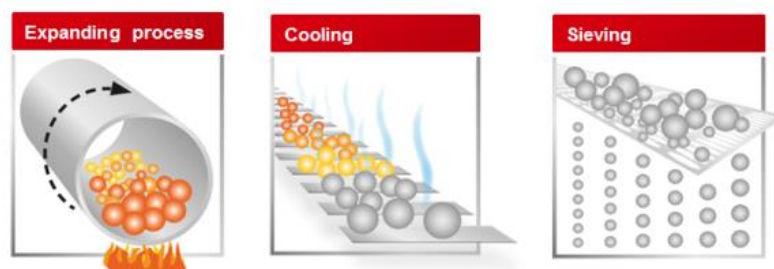
Joonis 1.3 Paisutatud klaasgraanulid erinevates fraktsioonides [39]

Klaasi taaskasutamine aitab säästa energiat ja loodusressursse. 1 kg taaskasutatud klaasi asendab 1,2 kg algset toorainet. Klaasi taaskasutamine vähendab ka CO₂ heitkoguseid ja säästab loodusvarasid. [40]

Paisutatud klaasi tootmine

Klaasgraanulite tootmine algab klaasjäätmete kuivatamisest ning seejärel kõrvaliste elementide eemaldamisega, mis mõjutavad hiljem graanulite tootmist ning lõpp produkti kvaliteeti. Lisaks puhastatud klaasi jahvatamiseks ei kulu nii palju energiat kui mitte puhastatud klaasi jahvatamiseks. Puhastamise meetodeid on kaks: kuiv ja märg. Märg meetod on energiakulukam ning seda kasutatakse harvem. Klaasi puhastatakse ning sama aegselt ka purustatakse ning üheks võimaluseks on selleks kasutada süsteemi nimega „MUD“. See süsteem seisneb selles, et hõõrdumise teel klaasi purustatakse ning alles jäävad kõrvalised elemendid, mis peavad hõõrdumisele vastu. Seejärel klaas peenlihvatakse. Selleks võib kasutada tsentrifugaalveskit nimega „RM“. Selles veskis on pöörlevad kuulid, millega klaasi peenemaks jahvatatakse. Kogu protsess toimub vaakumis, et vältida tolmu sattumist klaasipuru sisse. [40]

Seejärel segatakse jahvatatud klaasipuru, sideaine ja paisutav aine ning vormitakse graanuliteks (Joonis 1.4). Seejärel kõrgel temperatuuril pöördahjus graanulid paisutatakse. Graanuleid kasutatakse peamiselt betoonis ja mörtides kergtäitematerjalina. [40]



Joonis 1.4 Klaasgraanulite tootmise protsess vasakult: paisumise protsess, jahtumine, sõelumine [40]

Paisutatud klaasi omadused

Paisutatud klaasgraanulitel on suhteliselt kõrge mehaaniline tugevus, madal veeimavus ning kõige keemiline ja külmakindlus [41]. Tabelis 1.2 on toodud ka uurimistöös kasutatud klaasgraanulite keemiline koostis. Lisaks on tabelis 1.3 toodud erinevates uurimistöödes ja tootjate paisutatud klaasgraanulite andmed.

Tabel 1.2 Paisutatud klaasi keemiline koostis (%) [42]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O+Na ₂ O	CaO+MgO	Fe ₂ O ₃	Muu
71,0-73,0	1,5-2,0	13,0-14,0	8,0-10,5	<0,3	<0,5

Tabel 1.3 Paisutatud klaasgraanulit mehaanilised andmed

Referents	Osakeste suurus, mm	Puistetihedus kg/m ³	Vee imendumine, %	Survetugevus, MPa	Soojusjuhtivus, W/(m*K)
Adhikary ja Rudzionis (2020) [43]	0,10-0,30	400	25	2,8	0,0767
	0,25-0,50	340	25	2,5	0,0767
	0,50-1	270	20	2,3	0,0713
	1-2	230	20	2	0,663
Yousefi jt. (2020) [44]	0,25-0,5	300	-	≥2,9	0,07
	0,5-1	250	-	≥2,6	0,07
	1-2	220	-	≥2,4	0,07
	2-4	190	-	≥2,2	0,07
Stikloporas [42]	0,1-0,3	400	18	4,0	-
	0,25-0,5	340	20	2,5	0,0767
	0,5-1	270	18	1,7	0,0713
	1-2	230	18	2,0	0,0663
	2-4	200	15	1,4	0,0639
4-8	190	10	1,2	0,0661	
Stikloporas [45]	8-16	140	-	1	0,0594

Paisutatud klaasi kasutusvaldkonnad

Paisutatud klaasgraanuleid on uuritud kergbetoonis. Adhikary jt. on oma uurimuses [43] leidnud, et kergbetooni tugevust mõjutavad kasutatud klaasgraanulite suurused. Leiti, et väiksemad paisutatud klaasgraanulid andsin paremaid tugevusomadusi kui suuremad graanulid. Lisaks leiti, et betooni voolavust mõjutas paisutatud klaasgraanulite suurus.

1.4 Lubi

Lubjakivi

Lubjakivi on settekivim. Värvuselt on lubjakivi heledamat tooni (valge, hall, roosakas-, punakas-, rohekas- või kollakashall). See koosneb peamiselt kaltsiidist, kuid esineb peamiselt erinevate lisanditega. Lisandid määravad ära ka lubjakivi jaotuse. [46]

Lubjakivi kasutamisel ehitusmaterjalina tuleb jälgida selle keemilist koostist, sest need võivad osutada sobimatutest. Lubjakivi on ka poorne ning pooride suurus ja kogus on olemas paekivi veeimavus ning võimalus seda edaspidi kasutada. Lubjakivi vastupidavus veele ja hapetel on madal ning ebapüsiv. Lubjakivi veeimavus on 0,2-10 massi%, mis ütleb, et lubjakivil on madal külmakindlus. [33]

Lubi sideainena

Lubjakivist toodetud sideained kuuluvad mineraalsete sideainete hulka. Mineraalsed sideained jagunevad kolmeks: hüdraulilised, õhksideained ja magnesiaasideained. Lubjakivist saadud sideained kuuluvad nii õhksideaineteks kui ka hüdraulilisteks sideaineteks. [33]

Lubjakivist sideaine tegemine algab lubjakivi kaevandamisest ning selle peenestamisest. Õhklupja saadakse lubjakivi põletamisel 900 °C juures. Selle tagajärjel tekivad kustutamata lubi (CaO) ja eraldub süsihappegaas (CO₂). Seejärel lisatakse kustutamata lubjale vett ning saadakse kustutatud lubi. Hüdraulilist lupja saadakse silikaate sisaldavast lubjakivimist, mida põletatakse umbes 1200 °C juures. [14]

Lupjade klassid

Eestis kasutatakse ehituslupjade liigitamiseks standardit EVS-EN 459-1 [47]. Standardi järgi jaotatakse ehituslupjad alamperekondadeks vastavalt tabelile 1.4. Lisaks on standardis ära toodud ka erinevate ehituslupjade määratlused, klassifikatsioonid, vastavuskriteeriumid ning keemilised ja füüsilised nõuded.

Tabel 1.4 Standardi EVS-EN 459 järgi ehituslupjade jagunemine

Ehituslubi	
Õhklubi	Hüdrauliliste omadustega lubi
CL – kaltsiumlubi	NHL – looduslik hüdrauliline lubi
DL – dolomiitlubi	HL – hüdrauliline lubi
	FL – väärstatud lubi

Järgnevalt on toodud standardi [47] kirjeldused erinevatele lupjadele:

- Nii kaltsiumlubi (CL) kui ka dolomiitlubi (DL) omakorda jaotatakse vastavalt CaO + MgO sisalduse järgi klassidesse.
- Looduslikku hüdraulilist lupja (NHL) saadakse lubjakivi põletamisel, mis sisaldab suuremal või vähemal määral savi või räni. See ei tohi sisaldada mingeid muid lisaneid, ainult jahvatust soodustavaid lisandeid võib olla kuni 0,1%. Looduslikku hüdraulilist lupja klassifitseeritakse tugevuse järgi klassidesse.
- Vääristatud lubi (HL) koosneb õhklubjast (CL) ja/või looduslikust hüdraulilisest lubjast (NHL) koos hüdrauliliste ja/või putsolaansete lisanditega.
- Hüdrauliline lubi (HL) koosneb lubjast ning sisaldab tsementi, kõrgahjuräbu, lendtuhka, lubjakivi fillerit ning muid sobivaid materjale. Selle lubja omadus on tarduda ning kivineda vee all. Hüdraulilist lupja klassifitseeritakse ka tugevuse järgi klassidesse.

Lubja omadused

Õhklubi sideainena tardub veega kokkupuutudes ning kivineb õhu käes. Õhklubja veega kokkupuutumist nimetatakse lubja kustutamiseks. Lubja kustutamise protsessi käigus, kus õhklubjale (CaO) lisatakse vett, tekib selle tagajärjel kustutatud lubi. See protsess on eksotermiline protsess ehk selle käigus eraldub ka soojus. Kivinedes on sellel suhteliselt madal tugevus ning külmakindlus. Vee keskkonnas pole õhklubi püsiv. [33]

Kustutatud lubjast saadud mörtide 28päevane survetugevus jääb 0,4-0,6 MPa vahele. Kustutamata lubjast saadud mörtide survetugevus on kõrgem ehk 5MPa. Samas nende kasutamisel tekivad mahumuutuste tõttu praod. [33]

Hüdrauliliste omadustega lubjad kokkupuutel veega tarduvad ning kivinevad süsihappegaasi toimel ehk karboniseeruvad. Ainult hüdrauliline lubjal (HL) on omadus lisaks õhu käes kivinemisele ka tarduda ning kivineda vee all. [47]

Karboniseerumine

Karboniseerumine ehk karbonaatne kivinemine tekib kui õhus oleva süsihappegaasi ning vee toimel kustutatud lubi moodustab kristalse kaltsiumkarbonaadi. Selle jooksul lubimört muutub tugevamaks ja tihedamaks. [33]

Karboniseerumisprotsess on pikk ning aeglane ning suurem osa toimub esimestel kuudel. Karboniseerumine toimub väljast sissepoole, sest välimine kiht puutub rohkem kokku õhuga. [48]

De Almendra Freitas jt. leidsid oma uurimuses [48], et karboniseerumise protsent kahe aasta pärast on teoreetilisest täielikust karboniseerumisest keskmiselt 75%. See kinnitab, et karboniseerumisprotsess kestab aastaid. Lisaks leiti uuringus, et karboniseerumist mõjutas väliskeskkonna niiskus.

Lubikrohv

Lubikrohvi kasutatakse Eestis juba alates 1200. aastast. Erinevatele pindadele on olemas erinevaid lubikrohve, näiteks niiskematesse ruumidesse, nii välis- kui ka sisetingimustesse, hallikamaid ja valgeid. Lubikrohv on süsihappegaasi toimetel kivistunud ning sellele on lubjale sarnaselt head omadused imada ja jaotada ühtlaselt vett ning lasta sellel ka välja kuivada. Lisaks on lubikrohv õhku läbilaskev. [18]

Tadelakt on spetsiifiline lubikrohv. See pärineb Marokost Marrakechi piirkonnast. Tadelakti krohvisegu sisaldab kümneid erinevaid lisaneid, näiteks räniliivad, erinevad savid, peenestatud merekarbid ja marmorsegud. Seda kasutatakse kohtades ja ruumides kus soovitakse veekindlust. Nimelt tadelakt on veekindel krohvisegu. Lisaks talub see kõrgeid temperatuure, mistõttu sobib see hästi saunadesse, vannitubadesse ja basseiniruumidesse. Krohvitud pind jääb sile ning läike kumaga. [18]

2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Käesoleva töö eesmärgiks on välja selgitada, kuidas mõjutab paisutatud klaasgraanulite lisamine soojus- ja niiskustehnilisi omadusi looduslikes ehitusmaterjalides – kanepibetonis ja lubikrohvis, kus sideaineks on kasutatud hüdraulilist lupja.

Praktiline osa koosneb katsekehade valmistamisest ja nende soojus- ja niiskustehniliste katsete läbiviimises. Uuritakse erinevate segude kapillaarset veeimavust, sorptsiooni ja desorptsiooni, veeauru läbilaskvust ja soojuserijuhtivust. Niiskustehnilised katsed on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Soojuserijuhtivuse katse on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli Ehitiste projekteerimise ja arhitektuuri instituudi Mäemajas insener Mattias Põldaru poolt.

Uurimistöö katseplaan:

- 1) Katsekehade valmistamine ja karboniseerumine
- 2) Soojus- ja niiskustehnilised katsed:
 - kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine
 - hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine
 - veeaurujuhtivuse määramine
 - soojuserijuhtivuse katse
- 3) Katseandmete analüüs ja tulemuste vormistamine.

3. MATERJAL JA METOODIKA

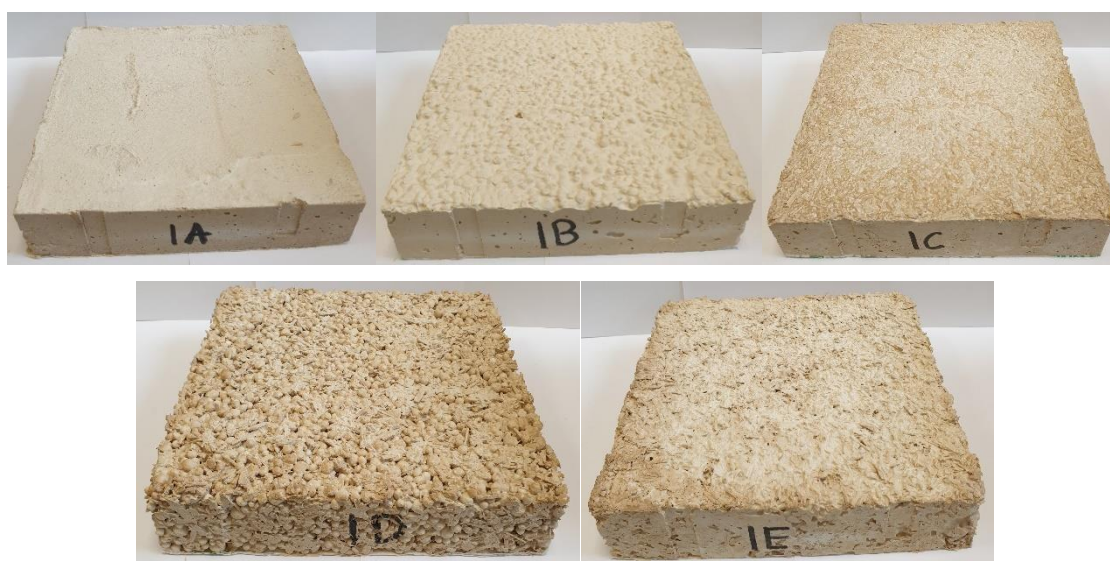
3.1 Katsekehad ja karboniseerumiseprotsess

Uurimustöö teostati looduslike ning taaskasutatud ehitusmaterjalide tootearenduse eesmärgil. Katsekehad valmistati 12. aprillil 2022. aastal Moostes Saviukumaja OÜ ruumides. Mörtide konsistentsi määrasid tootjad kohapeal.

Kokku valmistati viis erinevat segu.

- **segu A:** NHL lubikrohvi täitesegu, millele on lisatud klaasgraanuleid suurusega 4-8 mm. Vahekorras 1 osa täitesegu ja 0,5 osa klaasgraanuleid.
- **segu B:** 1 osa looduslikku hüdraulilist lupja klassiga 3,5 (NHL 3,5) ja 2,75 osa klaasgraanulid suurusega 4-8 mm, millele on lisatud lisandid F4M ja R1.
- **segu C:** 1 osa NHL 3,5 ja 2,6 osa kanepiluu, millele on lisatud lisandid F4M ja R1.
- **segu D:** 1 osa NHL 3,5, 1,5 osa kanepilud ja 1,5 osa klaasgraanulid suurusega 4-8 mm.
- **segu E:** 1 osa NHL 3,5, 1,5 osa kanepilud ja 1,5 osa klaasgraanulid suurusega 8-16 mm.

Mörtide täpne koostis jääb kokkuleppel tootjaga käesolevas uurimistöös avaldamata.



Joonis 3.1 200 x 200 x 45 mm suurused katsekehade näited igast segust (autori fotod)



Joonis 2.2 Vasakult: plaadikujulised katsekehad kuivamas Moostes, silindrikujulised katsekehad kuivamas Moostes, prismakujulised kangid Tartu kolledžis (autori fotod)

Järgnevate katsete tegemiseks valati mördisegu sobivatesse vormidesse (Joonis 3.2) – silindrikujulised katsekehad mõõtmatega 100 x 40 mm (diameeter, kõrgus), prismakujulised kangid mõõtmatega 160 x 40 x 40 mm (pikkus, laius, kõrgus) ja plaadikujulised katsekehad mõõtmatega 200 x 200 x 45 mm (laius, pikkus, kõrgus) (Joonis 3.1). Silindrikujulisi katsekehi kasutati hügrokoopsete sorptsioonimaduste määramise katses ja veeauru läbilaskvusomaduste määramise katses. Prismakujulisi kange kasutati kapillaarse veeimavuse katses ning plaadikujulisi katsekehi soojuseriituvuse katses.

Esimesed 6 päeva hoiti katsekehi Moostes Saviukumaja OÜ ruumides. Nendel päevadel polnud võimalik tagada kindlat temperatuuri ja õhuniiskust. Katsekehi prooviti hoida võimalikult standardi EVS-EN 1015-18:2005 [8] järgi ja õhuniiskuse tagamiseks hoiti katsekehi kile all.

Esimesed 6 päeva hoiti katsekehi tingimistes:

- õhutemperatuur keskmiselt 13,7 °C, täpsemalt vahemikus 10,8 °C-16.6 °C
- suhteline õhuniiskus keskmiselt 86,4 %, täpsemalt vahemikus 63,9%-94,9%

18. aprillil 2022. aastal transporditi katsekehad Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži katsemajasse nr. 1. Seejärel hoiti katsekehi keskmiselt 63% suhtelise õhuniiskuse juures ja temperatuuril 23 °C kuni 13. septembrini 2022. aastal (Joonis 3.3). 13. septembril 2022. aastal toodi katsekehad katsemajast kolledži ruumidesse tubastesse tingimustesse, kus nad olid kuni katsete alguseni.

Katsekehade stabiliseerumiseks ja karboniseerumise võrdlemiseks kaaluti neid regulaarselt vahemikust 18.04.2022 kuni 13.06.2022. Kaalumiste andmed on esitatud lisa (Lisa 1 – Lisa 3). Lisaks doseeriti karboniseerimisprotsessi kiirendamiseks katsemajja süsinikdioksiidi: vooluhulk 20l/s 5 või 10 minutit üks kord päevas (Lisa 4). Karboniseerumist kontrolliti fenoolftaleiini lahusega.

Katsemaja õhutemperatuuri, suhtelise õhuniiskuse ja süsihappegaasi kogus salvestati andmekogujaga Green Eye CO2 Logger AZ-7798.



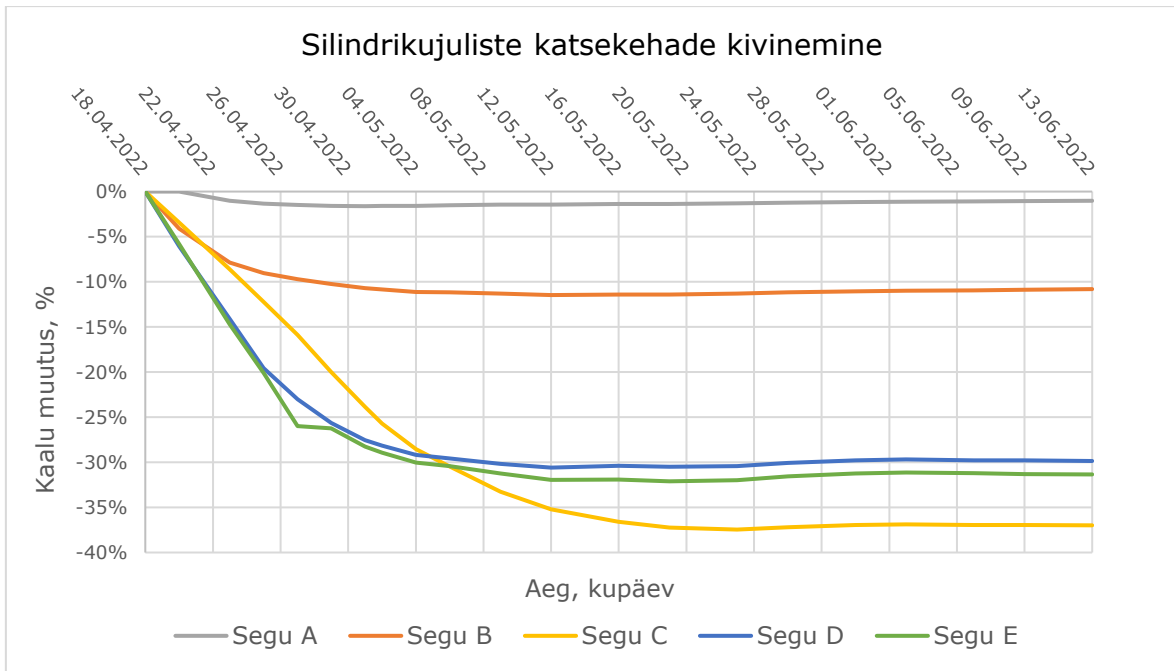
Joonis 3.3 Katsekehad Tartu kolledži katsemajas nr. 1. Vasakult: silindrikujulised katsekehad, plaadikujulised katsekehad ja prismakujulised kangid (autori fotod)

Kivinemisperioodi ajal jälgiti katsekehade kaalude stabiliseerumist ehk millal katsekehade kaal hakkas tõusma. Katsekehade kaalu muutused on välja toodud joonistel 3.4-3.6.

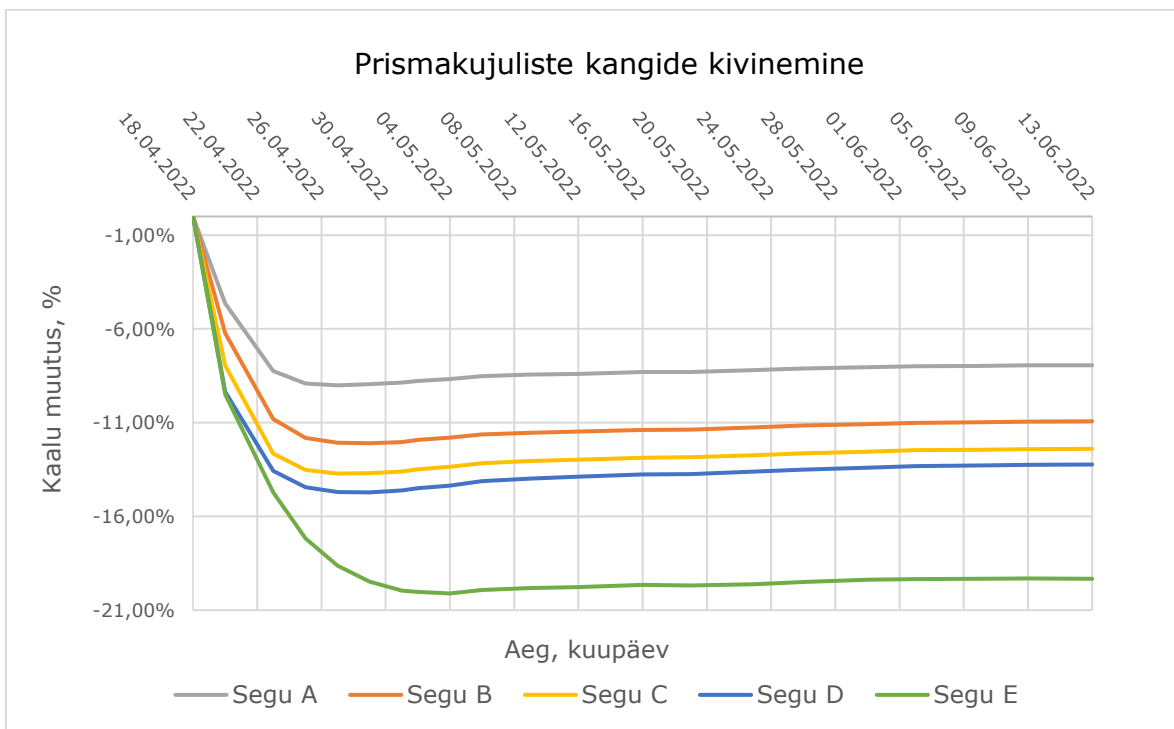
Silindrikujulistest katsekehadest stabiliseerus kõige rutem segu A (lubikrohv klaasgraanulitega ilma kanepita) katsekehad (14 päevaga). Kõige kauem võttis silindrikujulistest katsekehadest kaalu stabiliseerumiseni aega segu C (lubi, kanepiluu ja lisandid ilma klaasita) katsekehadel (38 päeva).

Prismakujuliste kangide kaalud stabiliseerusid kiiremini võrreldes teiste kujuliste katsekehadega. Kõige kiiremini stabiliseerusid segude A, C ja D katsekehad (u. 11 päeva) ning kõige aeglasemini segu E (lubi, kanepiluu ja suured klaasgraanulid) katsekehad (18 päeva).

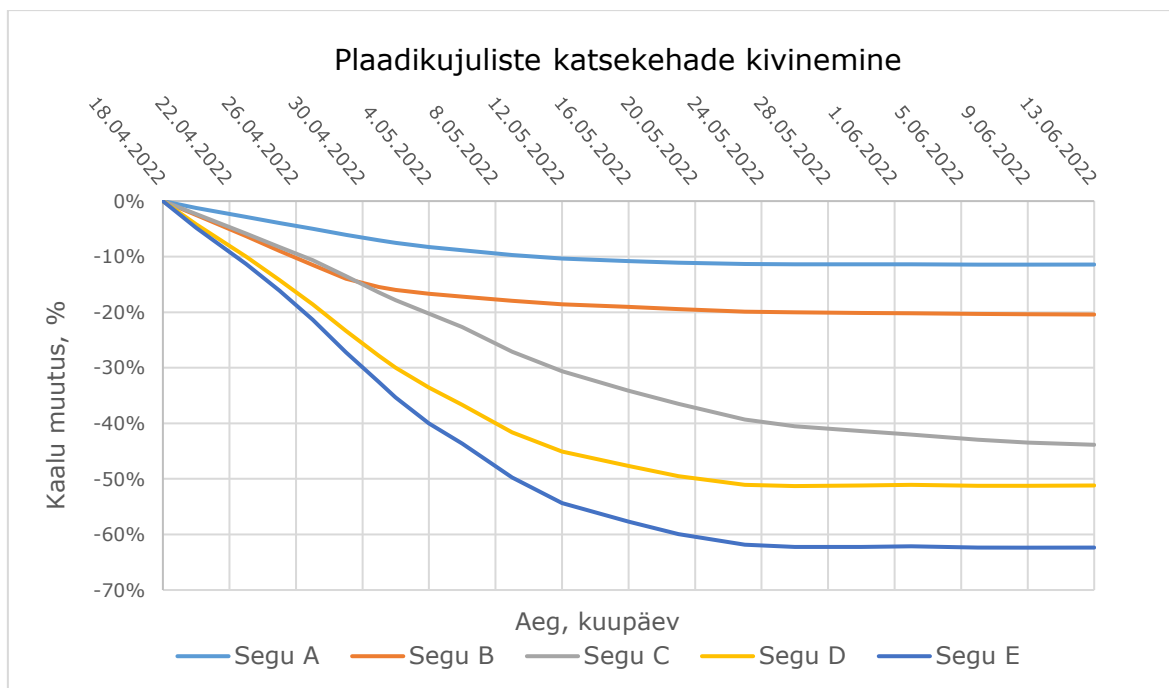
Kõikidest erinevate kujudega katsekehadest võttis kõige kauem aega stabiliseerumiseks plaadikujulised katsekehad. Enamus neist hakkasid stabiliseeruma 63 päeva pärast. Kõige kiiremini stabiliseerusid neist segude D (lubi, kanepiluu ja väikesed klaasgraanulid) ja E (lubi, kanepiluu ja suured klaasgraanulid) katsekehad.



Joonis 3.4 Silindrikujuliste katsekehade kaalu muutused ajas



Joonis 3.5 Prismakujuliste katsekehade kaalu muutused ajas



Joonis 3.6 Risttahukakujuliste katsekehade kaalu muutused ajas

Lisaks jälgiti katse ajal katsekehade karboniseerumist, mida kontrolliti silindrikujuliste katsekehadega. Selleks tilgutati igast segust number kaks katsekehale peale fenoolftaleiini lahust. Esimene kord tilgutati peale 6. mail, teisel korral 16. mail ning kolmandal korral 2. juuni. 2022. aastal. Lisas on välja toodud pildid karboniseerumisest (Lisa 5). Joonistelt on näha, et õhuga kontaktis olev pealmine pind on rohkem karboniseerunud ehk fenoolftaleiiniga kokkupuutest on näha vähe lillakat pinda. Alumised pinnad karboniseeruvad aeglasemalt ning äärtest sissepoole. Lisaks kontrolliti fenoolftaleiini lahusega katsekehi 12. jaanuaril 2023. aastal enne katsete tegemist (Lisa 6).

3.2 Katsete metoodika

3.2.1 Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine

Materjalide kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramiseks kasutati standardit EVS-EN 1015-18:2005 Müürimörtide katsemeetodid osa 18: Kivistunud mördi kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine [8]. Katse teostamiseks kasutati prismakujulisi kange mõõtmetega 160 x 40 x 40 mm. Katse teostati 26. jaanuaril 2023. aastal Tartu kolledžis.

Katse põhimõte on see, et prismakujulised mördist katsekehad kuivatatakse konstantse massini ja seejärel süvistatakse need värskelt murtud pinnaga otsapidi kindlaksmääratud ajaks 5 kuni 10 millimeetrisügavusele vette ning määratakse massi juurdekasv.

Katses kasutatud seadmed ja materjalid:

- kandik – sügavusega vähemalt 20 mm
- plastikvõrk – katsekehade alla kandikule, et tagada vee vaba juurdepääs katsekeha murtud osale
- stopper – täpsusega 1 sekund
- Digitaalkaal Kern PLT 1200-3A – täpsusega 0,001 g
- ventileeritav kuivatuskapp Memmert UFB 500 – kuivatab temperatuuride vahemikus +30 °C kuni +220 °C täpsusega ±0,5 °C.
- destilleeritud vesi
- hüdroisolatsioonimastiks Kiilto Fibergum – sulamistemperatuur on üle 60 °C
- pintsel – hüdroisolatsioonimastiksi peale kandmiseks katsekehadele
- kipsinuga ja käsisaag – katsekehade poolitamiseks

Katse käiku alustati katsekehade kuivatamisega kuivatuskapis, kus nad olid vastavalt standardile EVS-EN ISO 12570:2000 [49] 70 °C ±2 °C juures nii kaua kuni kolmel järjestikul 24 tunni möödumisel tehtud kaalumiste massikadu erinevus ei ületanud lubatud 0,1 % kogumassist. Seejärel võeti katsekehad kuivatuskapist ja kaeti neljast pikimast küljest hüdroisolatsioonimastiksiga (Joonis 3.7). Katsekehade ebatasase pinna tõttu kanti peale mastiksit kahes kihis.



Joonis 3.7 Hüdroisolatsioonimastiksiga kaetud katsekehad (autori foto)

Seejärel asetati katsekehad uuesti kuivatuskappi $60\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ juurde kuni massi stabiliseerumiseni. Peale kuivamist katsekehad poolitati. Selleks kasutati kõigepealt kipsinuga mastiksi pinna lõikamiseks ja seejärel käsisaagi katsekehade poolitamiseks. Kandikusse asetati plastikvõrk ja seejärel destilleeritud vesi. Katse alustamiseks käivitati stopper ja asetati katsekehad ükshaaval kandikule. Seejärel kaeti kandik plastikkastiga, et hoida ära vee liigset aurustumist (Joonis 3.8). Katsekehad asetati kandikule murtud pool allpool ja asetades hoiti neid kaldu vältimaks õhumullide teket nende alla. Katsekehad olid 5-10 mm vee sees. Terve katse jooksul jälgiti ning hoiti vee taset.



Joonis 3.8 Katsekehad katse ajal kaetud kandikul (autori foto)

Katsekehasid kaaluti 10 minuti, 90 minuti, 4 tunni, 6 tunni, 10 tunni ja 24 tunni möödudes. Kaalumistel võeti katsekehad ükshaaval veest välja, kuivatati niiske lapiga vees olnud osa ära ja kaaluti. Pärast kaalumist asetati koheselt kandikule tagasi.

3.2.2 Hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine

Materjalide hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramiseks kasutati standardit EVS-EN ISO 12571:2021 *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of hygroscopic sorption properties* [6]. Katse teostamiseks kasutati silindrikujulisi katsekehi 100 x 40 mm (diameeter, kõrgus) ja kasutati kliimakambri meetodit. Katset alustati 16. jaanuaril 2023. aastal Tartu kolledžis.

Katse põhimõte on määrata vaba vee sisaldus erinevate suhtelise õhuniiskuse väärtuste juures materjalides, mis on poorsed ning vett läbilaskvad. Katset tehakse temperatuuri $23\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ juures ja nelja erineva suhtelise õhuniiskuse juures, mis on vahemikus 30% kuni 95%. Iga erineva suhtelise õhuniiskuse väärtuse juures kuivatati katsekehad konstantse massini. Sorptsiooni puhul suhteline õhuniiskus järk-järgult suureneb ja desorptsiooni puhul suhteline õhuniiskus järk-järgult väheneb ja lähtepunktiks on õhuniiskus 95%. Saadud tulemustest joonistatakse välja sorptsiooni- ja desorptsioonikõverad. Antud uurimistööd kasutati kliimakambri meetodit.

Katses kasutatud seadmed ja materjalid:

- kuivatuskapp Memmert UNE 600 – kuivatab temperatuuride vahemikus +30 °C kuni +250 °C. Täpsusega $\pm 0,5$ °C kuivatab kuni 99,9 °C juures ja üle 100 °C juures täpsusega ± 1 °C
- ühekordsed plasttaldrikud katsekehade alla, mis ei ima vett
- digitaalkaal Kern PLT 1200-3A – täpsusega 0,001 g
- kliimakamber RUMED 4101 – mõõdab suhtelise õhuniiskuse 20% kuni 95% juures täpsusega 2%-3% ning temperatuuride +0 °C kuni +60 °C juures täpsusega $\pm 0,5$ °C
- laboriruumi temperatuuri, suhtelise õhuniiskuse ja süsihappegaasi sisaldust kogus andmekoguja Green Eye CO2 Logger AZ-7798

Katse käiku alustati katsekehade kuivatamisega kliimakabris temperatuuri $40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ konstantse massini. Selleks pidi katsekeha massierinevus kolmel järjestikusel vähemalt 24 tunni möödumisel tehtud kaalumisel olema vähem kui 0,1% algkaalust. Seejärel pandi katsekehad kliimakambrisse temperatuuril $23\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ ja suhtelise õhuniiskuse 30% (Joonis 3.10). Seda temperatuuri hoiti terve katse käigus. Katsekehi kaaluti igapäevasel vähemalt 24 tunni möödudes. Selleks võeti katsekehad resti kaupa välja, kaaluti ja pandi kliimakambrisse tagasi (Joonis 3.9). Kui katsekehad olid saavutanud stabiilsuse, muudeti suhtelist õhuniiskust. Neli niiskuse etappi, mida antud töös kasutati olid 30%, 50%, 75% ja 95%.



Joonis 3.9 Katsekehad alustel (autori foto)



Joonis 3.10 Katsekehad kliimakabris (autori foto)

3.2.3 Veeauru läbilaskeomaduste määramine

Veeauru läbilaskeomaduste määramiseks kasutati standardit EVS-EN ISO 12572:2016 *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties – Cup method* [10]. Selleks kasutati silindrikujulisi katsekehi, mida kasutati eelmises katses. Katset alustati 2. märtsil 2023. aastal.

Katse põhimõte on katsekeha sulgeda õhutihedalt katsetopsi, mis sisaldab kas kuiva- või märgainet. Katsekehad asetatakse kontrollitava temperatuuri ja õhuniiskuseha keskkonda. Nii tekitatakse katsekeha mõlemale poole erinev veeauru rõhk. Kaalumiste teel tehakse kindlaks materjali veeauruläbivus. Antud uurimistööd kasutati märja tassi meetodit ehk katsetopsis kasutati märgainet.

Katses kasutatavad seadmed ja materjalid:

- kliimakaber RUMED 4101– mõõdab suhtelise õhuniiskuse 20% kuni 95% juures täpsusega $\pm 2\%$ - 3% ning temperatuuride $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ juures täpsusega $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Digitaalkaal Kern PLT 1200-3A – täpsusega 0,001 g
- katsetopsid – alt suletud
- kaaliumnitraadi (KNO₃) lahus
- toidukile ja paigaldusliimi tihendamiseks

Katse teostamiseks valiti standardist välja aururõhu tekitamiseks variant C 50/93. See tähendab, et kaalutopsi sisse tekitatakse 93% õhuniiskus ja teisele poole katsekeha 50%. Katset alustati kuivatatud katsekehade mõõtmisega. Katsekeha kõrgus ja diameeter saadi kolmest erinevast kohast mõõdetud keskmistena. Peale mõõtmist tihendati katsekeha ja vormi ääred paigaldusliimiga. Seejärel segati valmis kaaliumnitraadi lahus ja valati katsetopsidesse. Katsekeha ja lahuse vahele jäeti ruumi 15 ± 5 mm. Katsetopsid tihendati veelkord liimi ja toidukilega, et tagada õhukindlus. Valmis katsetopsid kaaluti ja paigutati kliimakambrisse temperatuurile $23 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ ja suhtelise õhuniiskuse 50% juurde. Katsetopse kaaluti iga päevaselt kuni katsekehade kaal stabiliseerus.

3.2.4 Materjalide soojuseri juhtivuse määramine

Soojuseri juhtivuse määramiseks kasutati standardit EVS-EN 12667:2001 *Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance* [4]. Selle katse jaoks kasutati plaadikujulisi katsekehi mõõtmetega 200 x 200 x 45 mm. Kokku katsetati 20 katsekeha ehk igast segust nelja katsekeha. Katse viidi läbi 28. märtsist kuni 12. aprill 2023. aastal.

Katse põhimõte on katsekeha panna soojusvoolumõõtmise mõõteseadmesse ning mõõta soojusvoo tihendust temperatuuri erinevuste abil, mis liigub läbi katsekeha ja soojusvoolumõõtmise enda. Soojusvoog läbib tahke katsekeha keskpunkti ning on kogu mõõtmise ajal ühesuunaline ja pidev. Standard näeb ette, et mõõdetakse iga materjali kohta ühte või kahte sarnast katsekeha.

Katses kasutatavad seadmed ja materjalid:

- Mõõteseades Laser Comp Fox 200TA
- Digitaalkaal – täpsusega 0,1g
- Nihik

Katse teostamiseks viidi katsekehad Tallinnasse Tallinna Tehnikaülikooli Mäemaja katselaborisse. Enne katsetamist hoiti katsekehi toatemperatuuril. Tallinnas võeti katsekehad vormidest välja ja puhastati lahtistest kanepiluu tükkidest. Seejärel mõõdeti katsekehad nihikuga ja mõõdeti mass, täpsusega 0,5%. Seejärel paigutati esimene katsekeha ühe prooviga mõõdetavasse mõõteseadmesse. Mõõteseadme on ühendatud arvuti tarkvaraga, mida on näha joonisel 3.11. Tarkvarasse määrati temperatuurid, mis jäävad katsekehast ülemisele plaadil (15 °C) ja katsekehast alumisele plaadile (5 °C). Need temperatuurid tagasid, et soojuseri juhtivuse tulemus on leitud 10 °C juures. Mõõteseadme ise mõõtis ka katsekeha kõrguse, mis mõõtmise lõppedes koos tulemustega näha oli. Lisaks mõõdeti katsekehade massid peale katset ning samuti ka peale kuivatamist. Katsekehad asetati mõõteseadmesse 28. märtsist alates ning viimane katsekeha võeti mõõteseadmest välja 12. aprillil. Ühe katsekeha mõõtmine kestis keskmiselt 168 minutit ehk ligi 3 tundi.

Kuna katsekehade pinnad olid ebaühtlased ning katse näeb ette, katsekeha ja seadme paralleelsete lehtede vaheline kontakt oleks võimalikult tihe, siis lihviti igast segust üks katsekeha siledamaks ning mõõdeti uuesti soojuseri juhtivus.



Joonis 3.11 Paremal mõõteseadme Fox 200 koos katsekeha IIIE-ga, vasakul mõõteseadme parameetrite määramiseks ja tulemuste saamiseks arvuti (autori foto)

4. TULEMUSED

4.1 Katsekehade tihedused

Tiheduse määramiseks kuivatati katsekehasid kuivatuskapis. Kuivatamise käigus kaaluti katsekehi regulaarselt kuni massi stabiliseerumiseni. Seejärel mõõdeti katsekehad üle ning arutati välja nende kuivtihedused, mille tulemused on esitatud tabelites 4.1, 4.2 ja 4.3. Kõige usaldusväärsemaks tiheduse andmeteks võib lugeda silindrikujuliste katsekehade andmeid. Prismakujulistes kangides ja plaadikujulistes katsekehades oli rohkem tühimikke. Plaadikujuliste katsekehade kuivtiheduse leidmiseks kuivatati igast segust ühte katsekeha ning ülejäänud katsekehade tihedused on leitud enne katset kaalutud kaalust.

Tabel 4.1 Silindrikujuliste katsekehade kuivmassid ja -tihedused

Silindrikujulised katsekehad	Katsekeha tüüp		Kuivmass, g	Keskmine kuivmass, g	Kuivtihedus, kg/m ³	Keskmine kuivtihedus, kg/m ³
	Segu A	IA		550,843	577,24	1299,387
IIA			595,134	1407,289		
IIIA			573,736	1340,281		
IVA			589,243	1393,359		
Segu B	IB		268,341	269,15	625,339	631,32
	IIB		263,663		621,956	
	IIIB		284,921		663,977	
	IVB		259,655		613,996	
Segu C	IC		258,679	258,75	633,064	623,76
	IIC		261,370		636,499	
	IIIC		245,274		579,989	
	IVC		269,665		645,507	
Segu D	ID		131,696	152,13	337,895	376,57
	IID		148,602		371,867	
	IIID		169,707		413,277	
	IVD		158,529		383,225	
Segu E	IE		129,045	138,38	331,921	357,23
	IIE		140,233		367,104	
	IIIE		148,098		375,252	
	IVE		136,150		354,629	

Tabel 4.2 Prismakujuliste kangide kuivmassid ja -tihedused

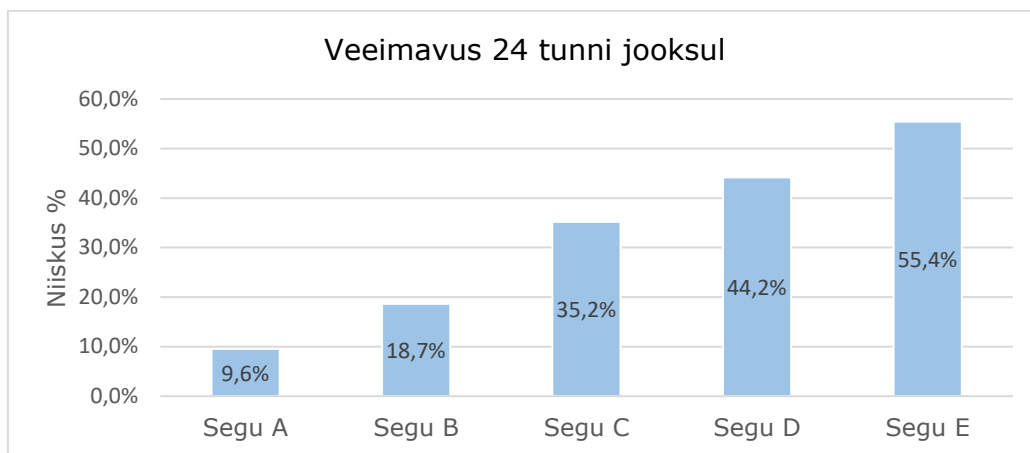
Prismakujulised kangid 160 x 40 x 40 mm	Katsekeha tüüp		Kuivmass, g	Keskmine kuivmass, g	Kuivtihedus, kg/m ³	Keskmine kuivtihedus, kg/m ³
	Segu A	IA		448,229	443,79	1750,895
IIA			436,660	1705,703		
IIIA			446,492	1744,109		
Segu B	IB		248,674	244,35	971,383	954,51
	IIB		240,259		938,512	
	IIIB		244,130		953,633	
Segu C	IC		218,287	216,28	852,684	844,83
	IIC		215,300		841,016	
	IIIC		215,246		840,805	
Segu D	ID		136,290	136,04	532,383	531,40
	IID		134,384		524,938	
	IIID		137,441		536,879	
Segu E	IE		133,963	133,23	523,293	520,41
	IIE		132,996		519,516	
	IIIE		132,718		518,430	

Tabel 4.3 Soojuseri juhtivuse katse plaadikujuliste katsekehade massid ja tihedused

Plaadikujulised katsekehad 200 x 200 x 45 mm	Katsekeha tüüp	Mass, g	Keskmine mass, g	Kuivmass, g	Keskmine kuivmass, g	Kuivtihedus, kg/m ³	Tihedus, kg/m ³	Keskmine tihedus, kg/m ³
	Segu A	IA	2981,60	3017,10	2977,2	2977,2	1711,16	1711,16
IIA		3060,20	-		-	-	1734,63	
IIIA		2999,40	-		-	-	1663,21	
IVA		3027,20	-		-	-	1707,30	
Segu B	IB	1606,40	1571,75	1601,2	1601,2	906,21	905,99	885,34
	IIB	1555,60		-	-	-	877,34	
	IIIB	1568,20		-	-	-	880,00	
	IVB	1556,80		-	-	-	878,02	
Segu C	IC	1428,80	1409,65	1412,6	1412,6	822,43	822,31	823,51
	IIC	1433,20		-	-	-	824,84	
	IIIC	1383,60		-	-	-	826,97	
	IVC	1393,00		-	-	-	819,93	
Segu D	ID	747,60	763,70	736,2	736,2	429,40	429,05	433,34
	IID	778,00		-	-	-	438,78	
	IIID	751,80		-	-	-	431,46	
	IVD	777,40		-	-	-	434,06	
Segu E	IE	703,80	706,75	690,0	690	395,05	394,94	393,41
	IIE	711,20		-	-	-	401,11	
	IIIE	714,40		-	-	-	400,89	
	IVE	697,60		-	-	-	376,70	

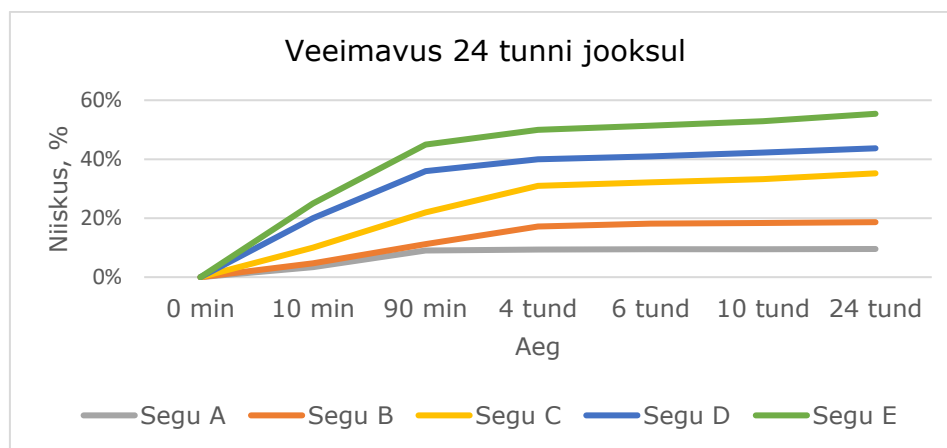
4.2 Kapillaarse veeimavus koefitsient

Katsekehad kaaluti katse käigus 10 minuti, 90 minuti, 4 tunni, 6 tunni, 10 tunni ja 24 tunni pärast. Tulemused fikseeriti (Lisa 7).

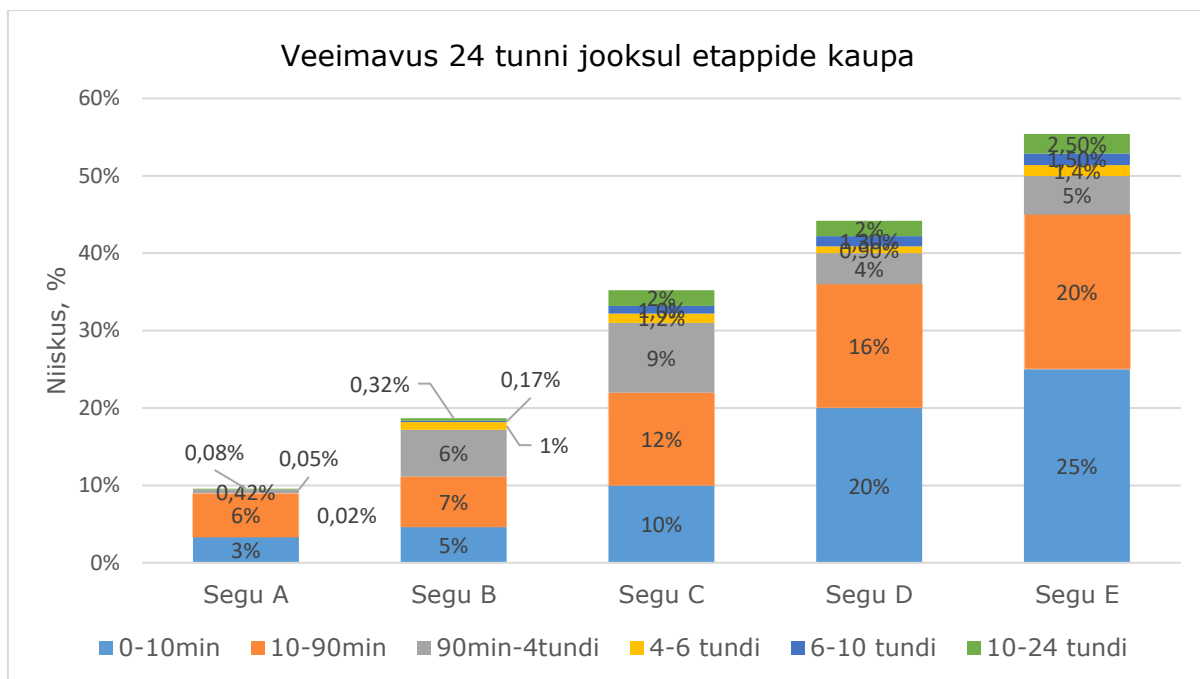


Joonis 4.1 Segude veeimavus 24 tunni jooksul

Katse jooksul võtsid katsekehad kaalu juurde 9,6–55,4% katsekeha kohta (Joonis 4.1). Kõige rohkem võtsid katsekehad kaalu juurde esimese kümne minuti jooksul (Joonis 4.2, 4.3). Umbes sama suurusjärgu võrra võtsid katsekehad juurde ka järgmises kaalumisetapis ehk 10-90 minuti vahel. Seejärel võtsid kõik katsekehad märkimisväärselt vähem kaalu juurde. Peale 90 minutit võtsid katsekehad keskmiselt juurde 0,57 – 13,2% (Joonis 4.3). Pärast 90 minuti möödumist ei võtnud segu A ja B katsekehad eriti kaalu juurde võrreldes teiste segudega (0,57-7,49% vs 4,2-13,2%). Kõige rohkem imas vett segu E ja kõige vähem segu A. Katse lõppedes olid kõik katsekehad veega küllastunud. Katsekehade veega küllastumise hetke ei fikseeritud.



Joonis 4.2 Segude veeimavus kogu katse vältel



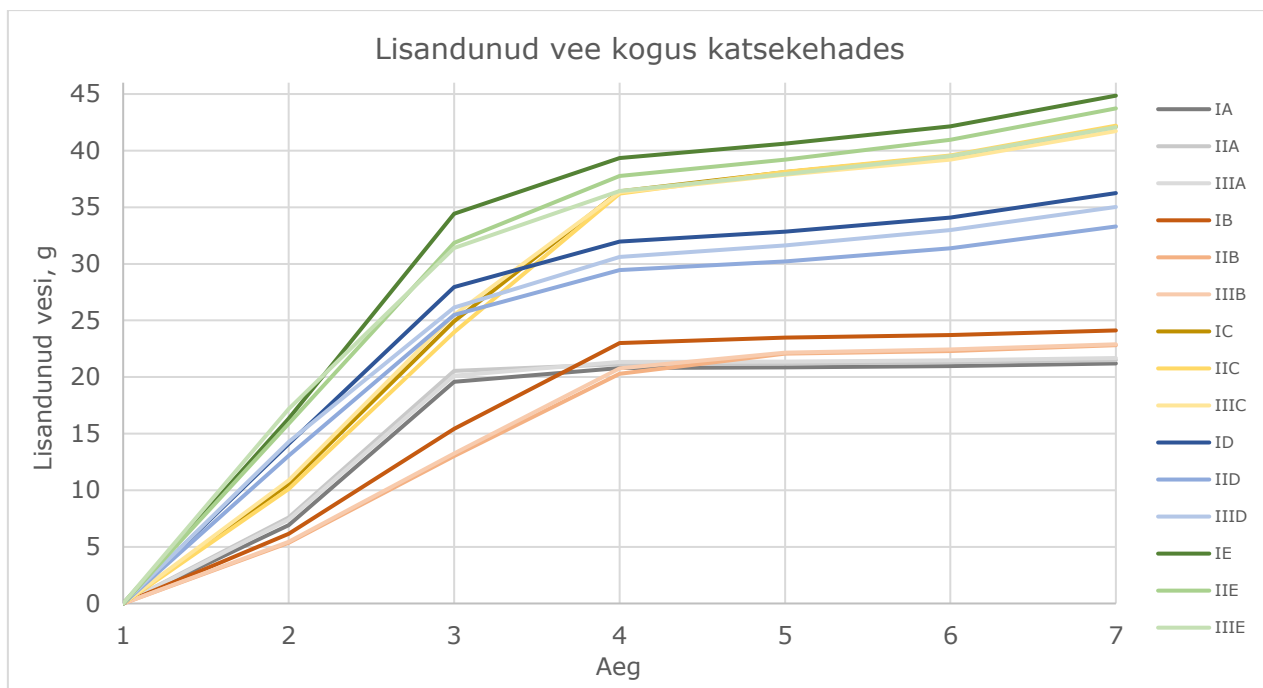
Joonis 4.3 Segude veeimavus 24 tunni jooksul etappide kaupa

Katse tulemusena leiti kapillaarse veeimavuse koefitsient. Veeimavuse koefitsient jäi vahemikku $0,83-1,61 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ (Tabel 4.4). Kõige väiksem veeimavuse koefitsient on segul C (lubi, kanep, lisandid ilma klaasgraanuliteta). Kõige suurem veeimavuskoefitsient on segul E (lubi, kanep, suured klaasgraanulid). Tulemustest on näha, et väikeste klaasgraanulite sisaldusega kanepibetonil (segu D) on mõnevõrra väiksem veeimavuse koefitsient kui ilma klaasgraanuliteta kanepibetonil (segu C). Seejuures suurete klaasgraanulitega kanepibetonil (segu E) on veeimavuskoefitsient suurem kui klaasgraanuliteta kanepibetonil (segu C).

Tabel 4.4 Materjalide veeimavuse määramise katse koondandmed ja veeimavusekoefitsient

	Veeimavuse määramise koondtabel				
	Segu A	Segu B	Segu C	Segu D	Segu E
Kaal katse alguses, g	218,70	121,15	106,74	67,39	65,97
Kaal 10 min (M1), g	226,00	126,79	117,25	81,19	82,44
Kaal 90 min (M2), g	238,79	135,04	131,54	93,91	98,53
Kaalu kasv 24 tundi, g	21,5	23,3	42,0	34,9	43,6
Vahe M2-M1, g	12,78	8,25	14,29	12,72	16,09
Koefitsient w , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$	1,28	0,83	1,42	1,27	1,61

Joonisel 4.4 on näha katsekehade vee sisalduse tõusu katse vältel. Ühe katsekeha vee sisalduses on leitud selle mõlema poole keskmise veesisalduse järgi.



Joonis 4.4 Katsekehade vee koguse tõus katse vältel

Kapillaarse veeimavuse koefitsientide võrdlemiseks erinevate segude korral kasutati ka t-testi, et leida kas erinevate segude vahel on erinevus statistiliselt oluline või mitte.

T-test on mõeldud kahe üldkogumi keskmiste (keskväärtuste) võrdlemiseks. Eesmärk selgitada, kas need kaks kogumit on vastava tunnuse keskmise poolest erinevad või mitte (viimase korral öeldakse, et erinevus on seletatav juhuslikkusega). Üks viis seda teha on kasutada vastavat Exceli protseduuri *t-Test: Two Sample Assuming Unequal Variances* (näidis vastusest on lisas 8). Seal on otsustada võimalik kahel viisil, lihtsam on otsustada p-väärtuse (nim. ka olulisuse tõenäosus) alusel, kui see on $<0,05$, siis on seos statistiliselt oluline, vastasel korral mitte (ehk erinevus on seletatav juhuslikkusega). Kuna grappe on rohkem kui kaks on mõeldav ka teha ANOVA test, aga see näitab seost kui leidub juba üksainus paarisside ja selle järel tuleks teha ikkagi mitu t-testi, seetõttu on valitud tee teostada kohe hulk t-teste.

Selleks leiti erinevate segu gruppide katsetulemuste väärtuste vahel t-testiga p-väärtused. P-väärtusi võrreldes leiti, et segude A-B, A-C, B-C, B-D ja B-E vaheline erinevus on statistiliselt oluline. Gruppide A-D, A-E, C-D, C-E ja D-E vaheline erinevus ei ole statistiliselt oluline ehk on seletatav juhuslikkusega. A-D p-väärtus on 0,927. Kõige statistiliselt olulisem on segude A ja B erinevus, nende p-väärtus oli 0,0129.

4.3 Hügroskoopsete sorptsiooniomadused

Hügroskoopsete sorptsiooniomaduste määramise katsel fikseeriti katsekehade kaalud kõigepealt adsorptsiooni käigus suhtelistel õhuniiskustel: 30%, 50%, 75% ja 95%. Seejärel desorptsiooni käigus suhtelist õhuniiskust langetades: 95%, 75%, 50% ja 30% juures. Kõikide kaalumiste andmed on esitatud lisas (Lisa 9 ja Lisa 10). Tabelites on näha, et katse esimene kaalu mõõtmine on tehtud suhtelise õhuniiskuse 34% juures, sest kliimakamber jäi täpselt seadistamata. Edaspidised kaaluandmed on vastavalt standardile.

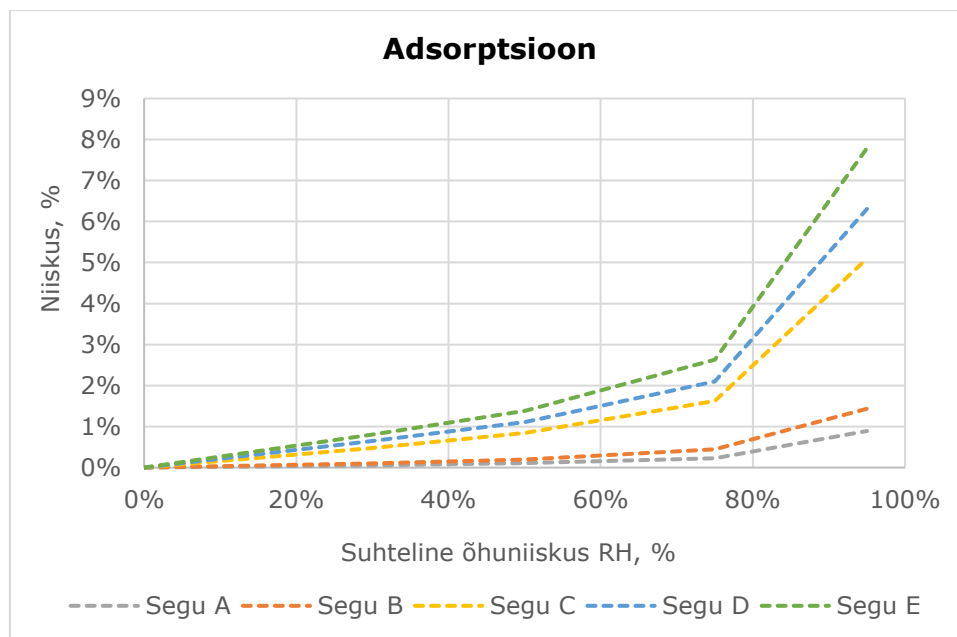
Adsorptsiooni ja desorptsiooni käigus saadi iga katsekeha kohta kaaluandmed. Standardi järgi peab kasutama vähemalt kolme katsekeha. Antud töös kasutati igast segust nelja katsekeha. Iga segu kohta leiti keskmine kaal kui saavutati katsekehade kaalu stabiliseerumine vastava suhtelise õhuniiskuse juures. Keskmiste kaaluandmete põhjal leiti, kui palju kaalu segu juurde võttis ning leiti ka segu niiskus.

Tabelist 4.5 on näha palju iga segu võttis imatud vee arvelt kaalu juurde. Tabelist tuleb välja, et kõige enam niiskusid segu C ja E võttes kuivkaalust juurde vastavalt 13,18 grammi ja 10,78 grammi. Teistest oluliselt vähem võttis terve adsorptsiooni käigus vett juurde segu B ehk klaasgraanulid koos loodusliku hüdraulilise lubjaga (3,86 g). Lisas 4.2 välja toodud kaaluandmete põhjal on näha, et kõige kauem stabiliseerusid katsekehad suhtelise õhuniiskuse RH 95% juures. See võttis 2 korda kauem aega kui teiste suhteliste õhuniiskuste juures. Iga suhtelise õhuniiskuse juures leidsid kõige kauem tasakaaluniiskust kanepit sisaldavad segud C, D ja E.

Tabel 4.5 Adsorptsiooni käigus katsekehades oleva vee kogus grammides

Segu tüüp	Vee sisaldus adsorptsiooni käigus, g			
	30%	50%	75%	95%
Segu A	0,34	0,62	1,32	5,15
Segu B	0,28	0,52	1,21	3,86
Segu C	1,23	2,19	4,20	13,18
Segu D	0,98	1,69	3,19	9,59
Segu E	1,11	1,91	3,64	10,78

Joonisel 4.5 on näha kõikide segude adsorptsiooni käigus kogutud niiskus vastava suhtelise õhuniiskuse juures. Jooniselt joonistub välja, et kõikide katsekehade niiskus suhtelise õhuniiskuse 95% juures tõusis hüppeliselt.



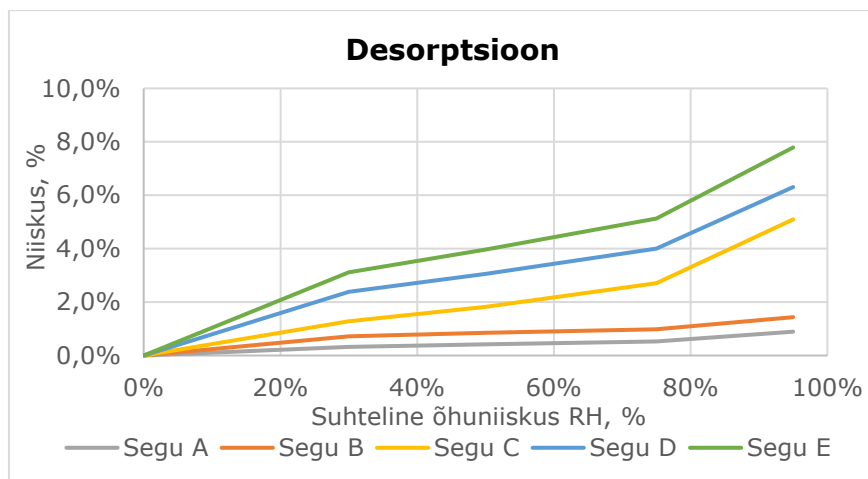
Joonis 4.5 Segude adsorptsiooni tulemused

Tabeli 4.6 põhjal on näha kui palju segud kuivasid võrreldes suhtelise õhuniiskuse 95% juures oldud kaaluga. Desorptsiooni lõpus paigutati katsekehad kuivatuskappi 40 kraadi juurde kuivama kuni kaalu stabiliseerumiseni. Kõige enam vähenes vee kogus segu C (lubi ja kanepiluu ilma klaasita) -9,86 grammi. Kõige vähem vähenes vee kogu segu B (lubi, klaas ja lisandid) -1.91 grammi. Kõige enam võttis algsest kuivkaalust juurde segu E (lubi, kanepiluu ja suured klaasgraanulid), koguni 2,45 grammi.

Tabel 4.6 Desorptsiooni käigus ära antud veekogu grammides

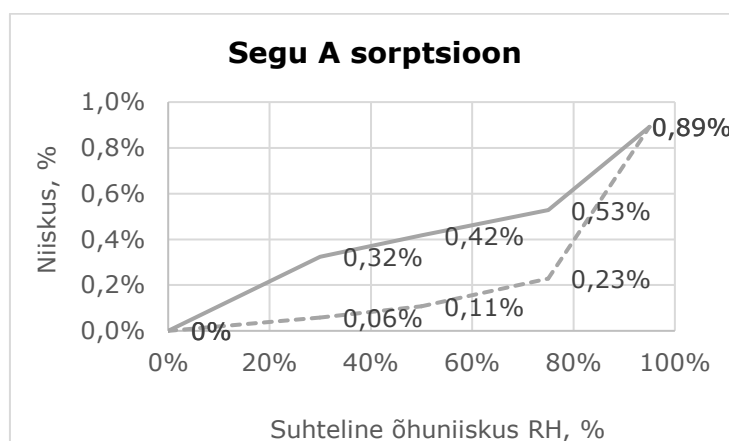
Segu tüüp	Vee sisaldus desorptsiooni käigus, g				
	95%	75%	50%	30%	Kuivatatud
Segu A	5,15	-2,10	-2,74	-3,28	-3,84
Segu B	3,86	-1,23	-1,58	-1,91	-2,37
Segu C	13,18	-6,19	-8,49	-9,86	-12,03
Segu D	9,59	-3,50	-4,95	-5,97	-7,68
Segu E	10,78	-3,69	-5,29	-6,47	-8,33

Joonisel 4.6 on näha desorptsiooni käigus segude niiskuse vähenemine. Sarnaselt adsorptsioonil vähenes kõikide segude kaal suhtelise õhuniiskuse 95%-lt minnes suhtelise õhuniiskuse 75% juurde. Samuti vähenes segude kaal suhtelise õhuniiskuse 30%-lt minnes 0%-ni.

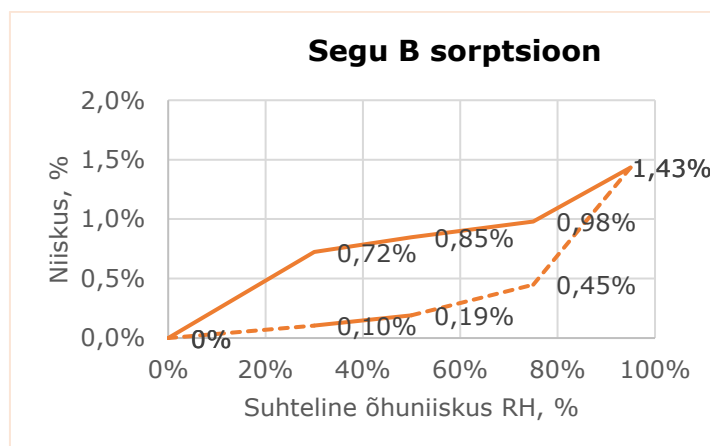


Joonis 4.6 Segude desorptsiooni tulemused

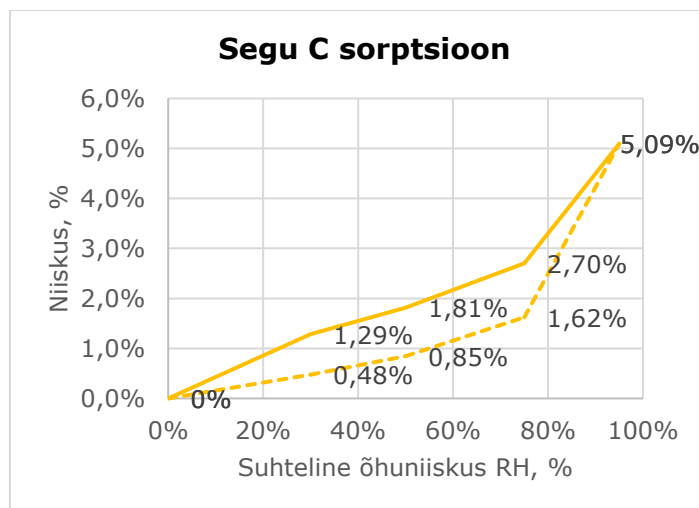
Järgnevalt on välja toodud iga segu kohta sorptsioonikõverad (Tabelid 4.7-4.11). Katkendjoonega on toodud adsorptsiooni tulemused kogu katse vältel ning pidevjoonega desorptsiooni tulemused kogu katse vältel.



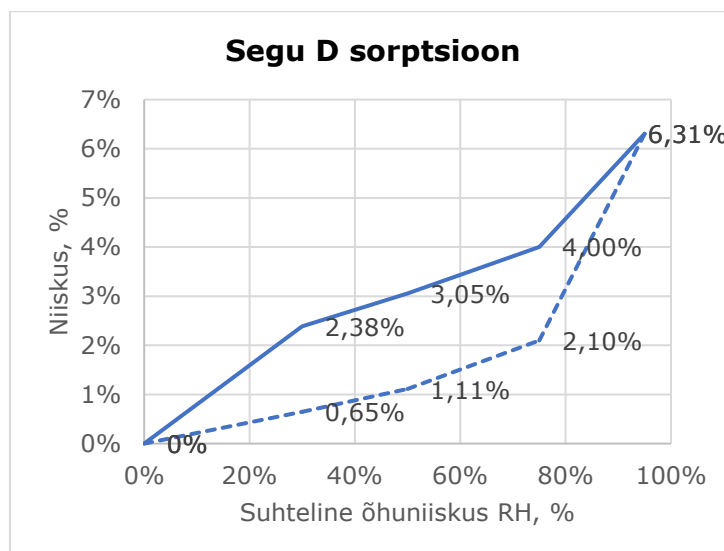
Joonis 4.7 Segu A sorptsioon



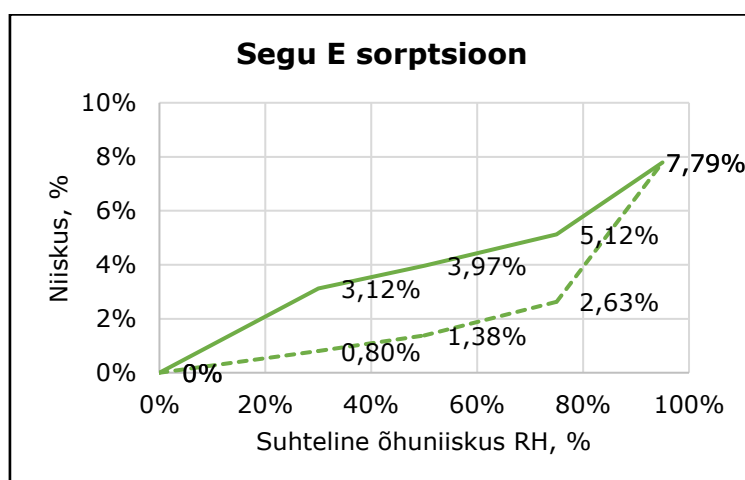
Joonis 4.8 Segu B sorptsioon



Joonis 4.9 Segu C sorptsioon



Joonis 4.10 Segu D sorptsioon



Joonis 4.11 Segu E sorptsioon

4.4 Veeauru läbilaskeomadused

Veeauru läbilaskeomaduste katses paigutati kliimakambrisse katsetopsid. Neid kaaluti iga 24 tunni järel kuni ööpäevane kaalulangus stabiliseerus. Selleks kulus kokku 12 päeva. Saadud kaaluandmed on esitatud lisa (Lisa 11). Järgnevate tulemuste leidmisel pole segu A puhul kasutatud katsekeha number kolm ja segu D puhul katsekeha number üks, sest nende katsekehade kaalu languse protsent erines suurelt võrreldes sama segu teiste katsekehadega.

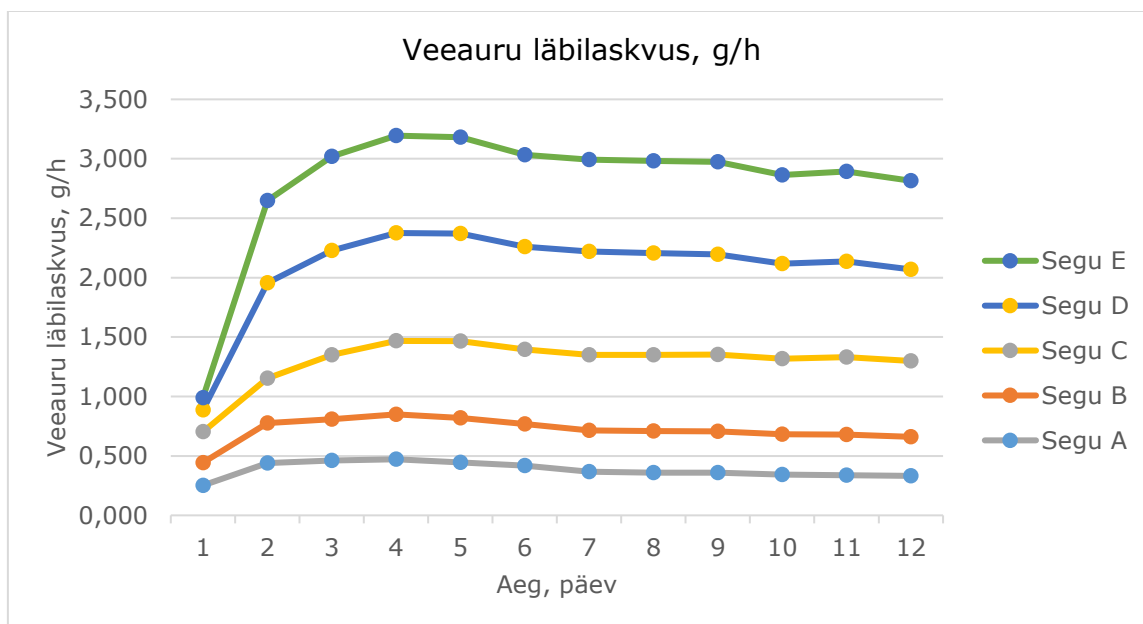
Katse tulemused arvutati viimase viie päeva kaaluandmetest. Keskmised veeauru läbilaskvuse andmed on esitatud tabelis 4.7. Keskmiselt kõige rohkem läbis viie päeva jooksul veeauru segu D katsekehade ehk kanepibeton koos 4-8 mm suuruste klaasgraanulitega (4,07 g) ning keskmiselt kõige vähem läbis veeauru segust B ehk lubja, lisandite ja 4-8 mm suuruste klaasgraanulitega segu (1,71 g).

Tabel 4.7 Katsekehade veeauru läbilaskvus ja katsekeha läbinud veeauru tulemused viimase 120 tunni jooksul

Katsekeha	Katsekeha läbinud veeaur, g		Veeauru läbilaskvus, g/h	
	Katsekeha kohta	Keskmine	Katsekeha kohta	Keskmine
IA	1,702	1,729	0,014	0,014
IIA	1,618		0,013	
IVA	1,866		0,016	
IB	1,649	1,710	0,014	0,014
IIB	1,717		0,014	
IIIB	1,690		0,014	
IVB	1,783		0,015	
IC	3,154	3,213	0,026	0,027
IIC	3,164		0,026	
IIIC	3,204		0,027	
IVC	3,330		0,028	
IID	4,571	4,073	0,038	0,034
IIID	3,622		0,030	
IVD	4,027		0,034	
IE	3,663	3,804	0,031	0,032
IIE	3,734		0,031	
IIIE	3,892		0,032	
IVE	3,925		0,033	

Joonisel 4.12 on toodud terve katse vältel kõikide segude keskmised veeauru läbilaskvused. Jooniselt on näha, et kõige rohkem vajasis aega veeauru läbivuse

stabiliseerimiseks kanepiluud sisaldavad segud C, D ja E. Nende veeauru läbivus stabiliseerus 6. päeval.



Joonis 4.12 Veeauru läbilaskvus terve katse perioodil

Veeauru erijuhtivus δ , veeauru difusioonitakistustegur μ ja materjali aurutakistus S_d on esitatud tabelis 4.8.

Tabel 4.8 Veeauru läbilaskeomaduste koondtabel

	G, kg/s	g, kg/(s*m ²)	W, kg/(s*m ² *Pa)	δ , kg/(m*s*Pa)	μ	S_d , m
Segu A	4,00*10 ⁻⁹	5,97*10 ⁻⁷	4,94*10 ⁻¹⁰	1,96*10 ⁻¹¹	10,24	0,41
Segu B	3,96*10 ⁻⁹	6,27*10 ⁻⁷	5,19*10 ⁻¹⁰	2,07*10 ⁻¹¹	9,66	0,39
Segu C	4,83*10 ⁻⁹	1,13*10 ⁻⁶	9,35*10 ⁻¹⁰	3,61*10 ⁻¹¹	5,55	0,21
Segu D	9,43*10 ⁻⁹	1,46*10 ⁻⁶	1,21*10 ⁻⁹	4,96*10 ⁻¹¹	4,08	0,17
Segu E	6,54*10 ⁻⁹	1,37*10 ⁻⁶	1,13*10 ⁻⁹	4,59*10 ⁻¹¹	4,37	0,18

Veeauru läbilaskeomaduste võrdlemiseks kasutati t-testi veeauru difusioonitakistusteguri võrdlemiseks. Selleks leiti erinevate segude katsekehade difusioonitakistustegurite gruppide vahel p-väärtused. P-väärtusi võrreldes leiti, et segude A-C, A-D, A-E, C-E, B-D, B-E, B-C ja C-D vaheline erinevus on statistiliselt oluline. A-C, D-E ja A-B vaheline erinevus ei ole statistiliselt oluline ehk on seletatav juhuslikkusega. D-E võrdluses on suurim p-väärtus (0,456).

4.5 Soojuserijuhtivus

Töös kasutati viit erinevat segu ning igast segust nelja katsekeha. Kokku leiti kolmel erineval konditsioneerimistingimustel soojuserijuhtivused. Kõigepealt leiti soojuserijuhtivused toatemperatuuril seisnud kõikidest katsekehadedest. Seejärel lihviti igast segust üks katsekeha ning mõõdeti lihvitud kastekeha soojuserijuhtivus. Lisaks kuivatati kuivatuskapis 60°C juures ka igast segust üks katsekeha ning mõõdeti kuivatatud katsekeha soojuserijuhtivus. Lihvitud ja kuivatatud katsekehad olid erinevad. Katsekehade kaaluandmed enne ja peale katset on esitatud tabelis 4.9.

Tabel 4.9 Katsekehade kaaluandmed enne ja peale soojuserijuhtivuse mõõtmiskatset

Katsekeha tüüp	Toatemperatuuril		Lihvitud		Kuivatatud		
	Mass enne katset, g	Mass peale katset, g	Mass enne katset, g	Mass peale katset, g	Mass enne katset, g	Mass peale katset, g	
Segu A	IA	2981,6	2981,4			2976,4	
	IIA	3060,2	3060,2				
	IIIA	2999,4	2999,2				
	IVA	3027,2	3027,4	2734,8	2734,6		
Segu B	IB	1606,4	1606,8			1600,4	1601,2
	IIB	1555,6	1556,0				
	IIIB	1568,2	1568,4				
	IVB	1556,8	1557,2	1477,6	1478,0		
Segu C	IC	1428,8	1429,0			1411,6	1413,6
	IIC	1433,2	1433,4				
	IIIC	1383,6	1384,0				
	IVC	1393,0	1393,4	1391,8	1392,0		
Segu D	ID	747,6	748,2			736,4	738,4
	IID	778,0	780,0				
	IIID	751,8	752,2	750,2	750,4		
	IVD	777,4	777,6				
Segu E	IE	703,8	704,0			690,0	692,6
	IIE	711,2	711,8				
	IIIE	714,4	716,0	712,0	712,4		
	IVE	697,6	697,8				

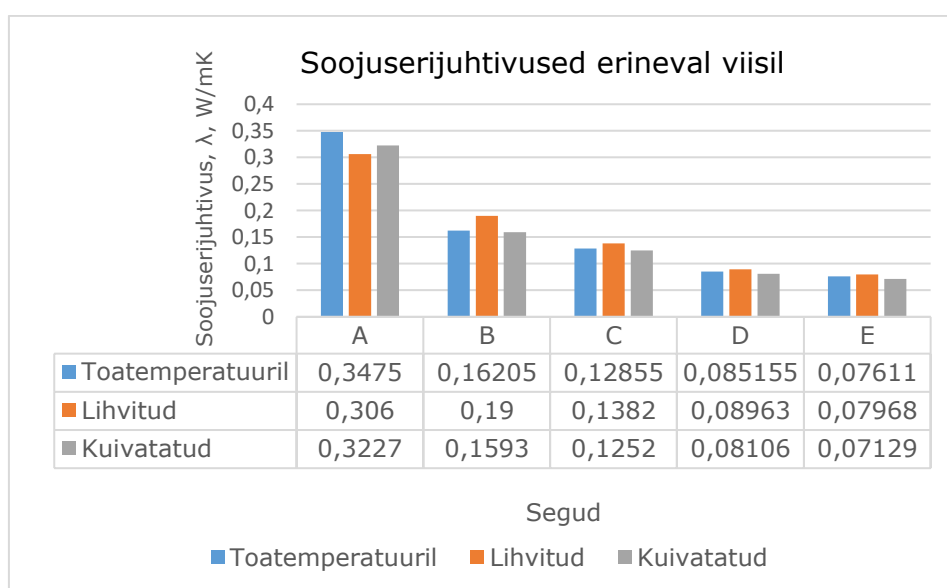
Katsest saadud soojuserijuhtivused on toodud tabelis 4.10. Kõige suurem soojuserijuhtivus on segul segul A (krohvisegu, klaasgraanulid ilma kanepita) 0,3475 W/mK. Ja kõige väiksem on soojuserijuhtivus segul E (lubi, kanepiluu ja suured klaasgraanulid) 0,0761 W/mK. Seega on kõige suurema soojuserijuhtivusega segu, mille kergtäitematerjali osa segust on kõige väiksem ning väikseim soojuserijuhtivus segul, kus on kergtäitematerjali osa kõige suurem. Segu B (lubi, kaasgraanulid ja lisandid) soojuserijuhtivus on 0,1621 W/mK. Segul C, mis sisaldab lupja, kanepit ja

lisandeid on soojuseri juhtivus 0,1286 W/mK. Segul D on väiksemad klaasgraanulid kui segul E ja selle tõttu on ka soojuseri juhtivus suurem 0,0797 W/mK.

Tabel 4.10 Erinevatel viisidel saadud soojuseri juhtivuste koondtabel

Katsekeha tüüp		Soojuseri juhtivus λ , W/mK			
		Toatemperatuuril		Lihvitud	Kuivatatud
Segu A	IA	0,3063	0,3475		0,3227
	IIA	0,3898			
	IIIA	0,3750			
	IVA	0,3189		0,306	
Segu B	IB	0,1606	0,1621		0,1593
	IIB	0,1628			
	IIIB	0,1647			
	IVB	0,1601		0,190	
Segu C	IC	0,1296	0,1286		0,1252
	IIC	0,1308			
	IIIC	0,1258			
	IVC	0,1280		0,1382	
Segu D	ID	0,0837	0,0852		0,08106
	IID	0,0868			
	IIID	0,0858		0,0896	
	IVD	0,0844			
Segu E	IE	0,0746	0,0761		0,07129
	IIE	0,0771			
	IIIE	0,0768		0,0797	
	IVE	0,0760			

Joonisel 4.13 on näha ka kuidas erinevatel tingimustel mõõdetud katsekehade soojuseri juhtivuse tulemusi.



Joonis 4.13 Soojuseri juhtivused erinevatel tingimustel

Soojuseriitvuse võrdlemiseks kasutati t-testi toatemperatuuril saadud soojuseriitvuste võrdlemiseks. Selleks leiti erinevate segugruppide katsekehade soojuseriitvuste vahel t-testiga p-vrtused. P-vrtusi võrreldes leiti, et kõikide segude vaheline erinevus on statistiliselt oluline, suurim p-vrtus on 0,003 segugruppide A ja B vahel.

5. ANALÜÜS

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks oli välja selgitada klaasgraanulite mõju loodusliku hüdraulilise lubja sideainega lubikrohvide ja kanepibetooni soojus- ja niiskustehnilistele omadustele. Selleks valmistati viis erinevat segu ning teostati neli katset. Nende kateset koodtulemused on esitatud tabelis 5.1.

Tabel 5.1 Katsetatud segude soojus- ja niiskustehniliste katsete tulemuste koondtabel

Omadused		Segu A – Lubikrohv 1+ Klaas 0,5	Segu B – Lubi 1+ Klaas 2,75+ Lisandid	Segu C – Lubi 1+ Kanep 2,6+ Lisandid	Segu D – Lubi 1+ Kanep 1,5 + Klaas (4- 8) 1,5	Segu E – Lubi 1+ Kanep 1,5+ Klaas (8-16) 1,5	
Tihedus, kg/m ³		1360,08 - 1733,57	631,32 - 954,51	623,76 - 844,83	376,57 - 531,40	357,23 - 520,41	
Veeimavuse koefitsient w, kg/(m ² *min ^{0,5})		1,28	0,83	1,42	1,27	1,61	
Veeauru difusioonitakistustegur μ		10,24	9,66	5,55	4,08	4,37	
Soojuseri juhtivus λ, W/mK		0,323 - 0,348	0,159 - 0,190	0,125 - 0,138	0,08106 - 0,08963	0,07129 - 0,07968	
Materjali aurutakistus S _d , m		0,41	0,39	0,21	0,17	0,18	
Sorptsiooniniiskus, %	0- 30%	Adsorptsioon	0,06	0,1	0,48	0,95	0,8
		Desorptsioon	0,32	0,72	1,29	2,38	3,12
	30- 50%	Adsorptsioon	0,11	0,19	0,85	1,11	1,38
		Desorptsioon	0,42	0,85	1,81	3,05	3,97
	50- 75%	Adsorptsioon	0,23	0,45	1,62	2,1	2,63
		Desorptsioon	0,53	0,98	2,7	4	5,12
95%	Sorptsioon	0,89	1,43	5,09	6,31	7,79	

Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine

Võrreldes omavahel segusid C, D ja E, siis on näha veeimavuskoefitsiendi järgi, et segu E imab rohkem vett kui segu C ja D. Seevastu segu D imab vähem vett kui segu C. Sellest võib järeldada, et veeimavust mõjutavad segus kasutatud klaasgraanulite mõõtmed. Suurema mõõduga klaasgraanulitega (8-16 mm) kanepibetoon imab rohkem vett kui väiksema mõõtmetega klaasgraanulitega (4-8 mm) kanepibetoon. Lisaks vähendab väiksemate klaasgraanulite kasutamine veeimavust võrreldes töös kasutatud kanepibetooniga.

Võrdluseks teiste allikate andmetel sarnaste materjalide veeimavusekoefitsient:

- karboniseeritud kanepibetoon jämeda kanepiluuga (sideaine: õhklubi) – 1,41-1,45 kg/(m²*min^{0,5}) [28]
- karboniseeritud kanepibetoon peene kanepiluuga (sideaine: õhklubi) – 1,86-1,90 kg/(m²*min^{0,5}) [28]
- Kanepibetoon (sideaine: CL90, NHL2, PC) – $\mu = 5,51$, $C = 3,09$ kg/(m²*h^{0,5}), $\lambda = 0,138$ W/mK [50]
- Tsementlubi mört: $w = 0,43$ kg/(m²*min^{0,5}) [51]
- Tsemendimört: $w = 1,35$ kg/(m²*min^{0,5}) [51]
- Traditsiooniline lubimört (CL90-S): $w = 2,36$ kg/(m²*min^{0,5}) [52]
- Loodusliku hüdrauliline lubimört (NHL 3,5 ja liiv): $w = 2,1$ kg/(m²*min^{0,5}) [53]

Võrreldes välja toodud uurimistöodes saadud kapillaarse veeimavuse koefitsientidega on loodusliku hüdraulilise lubjaga kanepibetooni ning õhklubja ja jämeda kanepiluuga kanepibetooni veeimavuse koefitsiendid sarnased (1,42 vs 1,41-1,45 kg/(m²*min^{0,5})). Loodusliku hüdraulilise lubikrohvi täitesegu koos klaasgraanulitega segu A (1,28 kg/(m²*min^{0,5})) võrreldes kirjanduses leitud sarnaste segude vahel, võib klaasgraanulite lisamine segule vähendada kapillaarset veeimavust. Sarnaselt segule A on ka loodusliku hüdraulilise lubja NHL3,5, klaasgraanulite ja lisanditega segu B (0,83 kg/(m²*min^{0,5})) veeimavuse koefitsient väiksem kirjanduses leitud segudega. Ainult tsementlubi mördi veeimavuse koefitsient on väiksem (0,43 kg/(m²*min^{0,5})).

Hügrokoopsete sorptsioonimaduste määramine

Võrreldes sorptsioonikatse tulemusi jagunevad katsekehad kaheks: segud A ja B ning segud C, D ja E. Segud A ja B on vastavalt väikeste klaasgraanulitega loodusliku hüdraulilise lubjakrohvi täitesegu ja klaasgraanulite ja lisanditega loodusliku hüdraulilise lubja NHL 3,5 segu. Nende nii adsorptsioon kui ka desorptsiooni kõverad on sarnased. On ka näha, et võrreldes teiste segudega niiskuvad nad vähem. Võrreldes segusid C, D ja E on näha samuti, et nende adsorptsiooni ja desorptsiooni kõverad on sarnased. Kõige enam niiskub neist segu E, seejärel D ja siis C.

Võrdluseks teiste allikate andmetel sarnaste materjalide niiskused:

- Karboniseeritud kanepibetoon jämeda kanepiluuga (sideaine: õhklubi) [28]
 - RH 30% - 2,4-3,1 % / 2-3 % (adsorptsioon/desorptsioon)
 - RH 50% - 4,3-4,6 % / 2-3 %
 - RH 75% - 6,6-7,0 % / 2-3%
 - RH 95% - 14,9-16,0 %

- Savikrohv kanepiluuga [54]
 - RH 0...30% - 0,96 % / 1,23 % (adsorptsioon/desorptsioon)
 - RH 30...50% - 1,46 % / 1,72 %
 - RH 50...80% - 2,37 %

Antud uurimistöös kasutatud materjalidega teisi sarnaseid tulemusi töö autor ei leidnud. Leitud andmeid võrreldes töös leitud andmetega saab järeldada, et lisandite kasutamine kanepibetonis ning ka klaasgraanulite kasutamine vähendavad niiskumist. Lisaks niiskub savikrohv kanepiluuga rohkem kui kanepibeton loodusliku hüdraulilise lubjaga.

Veeauru läbilaskeomaduste määramine

Kõige parem veeauru läbivus uuritud materjalides on segu D ($\mu = 4,08$) ehk kanepibeton väikeste klaasgraanulitega. Kõige väiksem veeauru läbivus on segul A ($\mu = 10,24$). Seejärel tuleb segu B ($\mu = 9,66$). Võrreldes segusid C, D ja E on näha, et klaasgraanulite lisamine segusse vähendab veeauruläbivust ($\mu = 5,55$ vs $\mu = 4,08/4,37$).

Kirjanduses leitud veeauru difusioonitakistustegurid:

- Karboniseeritud kanepibeton jämeda kanepiluuga (sideaine: õhkclubi) – 4,4 [28]
- Karboniseeritud kanepibeton peene kanepiluuga (sideaine: õhkclubi) – 3,5 [28]
- Savikrohv kanepiluuga – 3,2 [54]
- Traditsiooniline lubimört (CL90-S) – 16,6 [52]
- Mineraalvill – 1 [5]
- Kanepibeton (sideaine: CL90, NHL2, PC) – $\mu = 5,51$ [50]

Võrreldes kirjanduses leitud väärtusetega on kõik segud väiksema veeauruläbivusega kui mineraalvill. Kanepibetooni osas on kirjanduses leitud väärtused mõningal määral väiksemad kui antud uurimistööd leitud difusioonitakistustegurid.

Soojuseriituvuse määramine

Antud uurimistööd uuritud materjalide seas on kõige paremate soojusomadustega segu E ehk kanepibeton suurte klaasgraanulitega. Kõige vähem soojapidavam on segu A ehk loodusliku hüdraulilise lubikrohvi täitesegu klaasgraanulitega. Võrreldes segusid C, D ja E on näha, et klaasgraanulite lisamine muudab segu rohkem soojapidavamaks. Suuremate klaasgraanulitega segu on soojapidavam kui väikesemate klaasgraanulitega segu.

Kirjanduses leitud soojuserijuhtivuse tulemusi:

- Karboniseeritud lubimört (NHL 3,5, liiv ja vesi) – kuiv 0,69 W/mK, küllastunud 1,22 W/mK [55]
- Kanepibetoon, tihedus 307,5 kg/m³ (kustutatud lubi) – 0,0622 W/mK [30]
- Kanepibetoon, tihedus 917,2 kg/m³ (kustutatud lubi, R1) – 0,1369 W/mK [30]
- Kanepibetoon (CL-90, matakaoliin, tsement) – 0,108 W/mK [31]
- Kanepibetooniplokk, tihedus 330 kg/m³ (DL85-30-S1) – 0,07 W/mK [32]

Võrreldes uurimistööd kasutatud segusid kirjanduses leitud andmetega on suurte klaasgraanulitega kanepibetooni segu sarnane tehases toodetud kanepibetooniplokkile [32], kus on kasutatud sideainena dolomiitlupja. Kirjanduses olevate soojuserijuhtivuste tulemusi vaadates on väiksema tihedusega kanepibetoonidel paremad soojuserijuhtivused. Sama järeldub ka antud uurimistöö tulemustest.

Tabeli analüüs

Kui lubikrohvide lisada väheses koguses (0,5 kogust) klaasgraanuleid, saame toote, mille tihedus on 1360,08 – 1733,57 kg/m³, soojuserijuhtivus on 0,323 – 0,348 W/mK, difusioonitakistustegur on 10,24.

Segusid B (lubi, lisandid ja klaasgraanulid) ja C (lubi, lisandid ja kanep) omavahel võrreldes on koostises erinevus ühes komponendis. Lisaks hüdraulilisele lubajale NHL 3,5 ja lisanditele on ühele lisatud kanepiluid ja teisel paisutatud klaasgraanuleid. Tihedused B ja C segul on vastavalt 631,32-954,51 kg/m³ vs 623,76 – 844,83 kg/m³ ehk ligikaudu samad. Soojuserijuhtivused on B segul 0,159 – 0,190 W/mK ja C segul 0,125 – 0,138 W/mK. Difusioonitakistustegur on B segul 9,66 ja C segul 5,55. Kapillaarse veeimavuse koefitsiendid B segul 0,83 kg/(m²*min^{0,5}) ja C segul 1,42 kg/(m²*min^{0,5}). Võrreldes neid kahte segu siis on näha, et kanep suurendab veeimavust ja sorptsiooniomadusi ning vähendab difusioonitakistustegurit ja soojuserijuhtivust. Paisutatud klaasgraanulid seevastu vähendavad veeimavust ja sorptsiooniomadusi ning suurendavad difusioonitegurit ja soojuserijuhtivust.

Kõige väiksemad on tihedused ja soojuserijuhtivused on saadud katsekehade puhul, mis sisaldavad nii kanepit kui ka klaasgraanuleid. Nendeks on segud D (lubi, kanepiluu ja väikesed klaasgraanulid) ja E (lubi, kanepiluu ja suuremad klaasgraanulid). Tihedused on vastavalt 376,57 – 531,40 kg/m³ ja 357,23 – 520,41 kg/m³. Soojuserijuhtivused on vastavalt 0,08106 – 0,08963 W/mK ja 0,07129-0,07968 W/mK. Võrreldes neid omavahel on näha, et suuremate paisutatud klaasgraanulitega segul on

paremad soojuserijuhtivuse tulemused kui väiksemate paisutatud klaasgraanulitega segul.

Kõikide katsetatud segude omadused on väga erinevad. Kasutaja saab valida omale sobiva lahenduse vastavalt kasutusotstarbele. Segul D, mis sisaldab lupja, väiksemaid paisutatud klaasgraanuleid (4-8 mm) ja kanepiluud, on väike tihedus 376,57 – 531,40 kg/m³, soojuserijuhtivus – 0,08106 – 0,08963 W/mK, difusioonitakistustegur 4,08. Veeimavus 1,27 kg/(m²*min^{0,5}) on keskmiste hulgas ja sorptsioonivõime katsetatud toodete osas suuremate hulgas.

6. KOKKUVÕTE

Uurimistöö eesmärgiks oli uurida paisutatud klaasgraanulite mõju loodusliku hüdraulilise sideainega materjalide niiskustehnilisi omadusi ning klaasgraanulite mõju soojuserijuhtivusele. Selleks kasutati viit erinevat segu ning kokku 55 katsekeha. Kõiki katsekehi ühendas kasutatud looduslik hüdrauliline lubi NHL 3,5.

Kapillaarse veeimavuse määramiseks kasutati igast segust kolme katsekeha. Hügrokoopsete sorptsiooniomaduste, veeaurujuhtivuse ja soojuserijuhtivuse määramiseks kasutati igast segust nelja katsekeha.

Enne katsete tegemist tuginedes varasemale uurimistööle [56] lisati katsekehade kivinemisel õhku süsihappegaasi, et kiirendada lubjasideainega katsekehade karboniseerumist.

Töös saadud tulemuste põhjal võib teha järgmisi järeldusi:

- Suurema kergtäitematerjali (kanepiluu ja paisutatud klaasgraanulid) sisaldusega segud annavad väiksema soojuserijuhtivuse ehk parema soojapidavuse kui väiksema kergtäitematerjali sisaldusega segud. Lisaks võib järeldada, et suuremate klaasgraanulite (8-16 mm) kasutamine parandab rohkem soojapidavust kui väikeste klaasgraanulite (4-8 mm) kasutamine
- Paisutatud klaasgraanulid vähendavad veeimavust ja sorptsiooniomadusi ning kanep suurendab veeimavust ja sorptsiooniomadusi
- Antud töös saadud tulemusi võrreldes kirjanduses leitud sarnaste lubikrohvi uuringutest andmete võrdluses võib oletada, et paisutatud klaasgraanulid vähendavad kapillaarset veeimavust ja veeauru läbivust

Edasistes uuringutes tuleks paisutatud klaasgraanuleid katsetada ka kanepibetonis, millel on teine sideaine kui töös kasutatud looduslik hüdrauliline lubi. Samuti saab uurida paisutatud klaasgraanulite kasutamist savimörtides ja erinevate krohvimörtides. Töös kasutatud materjalide omadused on omavahel erinevad ning kasutaja saab valida endale sobivama vastavalt kasutusotstarbele.

7. SUMMARY

The aim of this paper was to examine the effect of using expanded glass granules in natural hydraulic binder materials has on its humidity conditions and thermal conductivity. Altogether, 55 subjects and five different mixtures were tested. All 55 subjects were made using natural hydraulic lime NHL 3,5.

Three subjects from each mixture were tested for capillary water absorption. For determining hygroscopic sorption properties, water vapour transmission properties and thermal conductivity, four of each mixture subjects were used.

Before the start of the experiment CO₂ was added into the air to speed up the carbonization of lime binders. This decision was based on previous studies [56].

Based on the results of the experiment the following conclusions can be made:

- Mixtures with a higher content of light filling materials (hemp and expanded glass granules) end up having a lower thermal conductivity, meaning they are better thermal insulators. Furthermore, using larger sized glass granules (8-16 mm) as opposed to smaller ones (4-8 mm) lowers thermal conductivity more,
- Expanded glass granules lessen water absorption properties and hygroscopic sorption properties and hemp increases water absorption properties and hygroscopic sorption properties,
- Additional experiments should be performed for a more precise result on the differences of using expanded glass granules in lime plaster. Comparing the results of this thesis to similar studies about lime plaster one can conclude that expanded glass granules in lime plaster decrease capillary absorption (soprtivity) and water vapour transmission properties.

In the following experiments blown up glass granules should be tested in hempcretes that have a different binder besides natural hydraulic lime. The materials properties of this thesis are different and the user can choose the most appropriate one according to the intended use.

8. KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. Ciucci, „Energiatõhusus,” september 2022. Loetud aadressil: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/et/sheet/69/energiatohusus>. [Kasutatud mai 2023].
- [2] W. S. Alex Sparrow, *The Hempcrete Book. Designing and building with hemp-lime*, Cambridge: Green Books, 2014. Loetud aadressil: <https://ebookscentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=5285830&q uery=building+with+hemp>.
- [3] M.-. j. taristuminister, „Eluruumile esitatavad nõuded seadus,” (Vastu võetud 2 juuli 2015, muudetud täiendatud, viimane jõustunud 12.07.2020). - Elektrooniline Riigi teataja. Loetud aadressil: <https://www.riigiteataja.ee/akt/109072020017>. [Kasutatud aprill 2023].
- [4] „EVS-EN 12667:2001 Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance,” Eesti Standardikeskus, 2001.
- [5] T. Masso, *Ehitusfüüsika ABC - soojus, niiskus ja müra*, Tallinn: Ehitame, 2012.
- [6] „EVS-EN ISO 12571:2021 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties,” Eesti standardikeskus, 2021.
- [7] V. Cascione, D. Maskell, A. Shea, P. Walker, „A review of moisture buffering capacity: From laboratory testing to full-scale measurement,” *Construction and Building Materials*, kd. 200, pp. 333-343, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.094>
- [8] „EVS-EN 1015-18:2005 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 18: Kivistunud mördi kapillaarse veeimavuse koefitsendi määramine,” Eesti Standardikeskus, 2005.
- [9] J. Lu, K. Wang, M-L. Qu, „Experimental determination on the capillary water absorption coefficient of porous building materials: A comparison between the intermittent and continuous absorption tests,” *Journal of Building Engineering*, kd. 28, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101091>
- [10] „EVS-EN ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method,” Eesti standardikeskus, 2016.
- [11] Parsons Healthy Materials Lab, *Hemp + Lime Examining the Feasibility of Building with Hemp and Lime in USA*, A. Mears, Toim., New York: Parsons Healthy Materials Lab, 2020. Loetud aadressil: https://prod-hml.s3.amazonaws.com/news/HEMPLIME-BOOKLET-Online-Version_2021-01-15-005423.pdf
- [12] Agriculture and rural development, "Harilik kanep," Loetud aadressil: https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/hemp_et#definitionandprovisions. [Kasutatud 3 aprill 2023].

- [13] Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus (EL) nr 1308/2013. (Vastu võetud 17.12.2023, muudetud, täiendatud ja viimati muudetud 13.04.2023) Loetud aadressil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A02013R1308-20230101&qid=1680551072968>. [Kasutatud 3 aprill 2023].
- [14] M. Chabannes, E. Garcia-Diaz, L. Clerc, J-C. Bénézet, É. Becquart, Lime Hemp and Rice Husk-Based Concretes for Building Envelopes, Šveits: Springer International Publishing AG, 2017. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=5089233>
- [15] S. Amziane, L. Arnaud, S. Amziane, Bio-Aggregate-based Building Materials : Applications to Hemp Concretes, Croydon: John Wiley & Sons, Incorporated, 2013, pp. 27-73. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/reader.action?docID=1124006&query=bio-aggregate-based+building+materials#>
- [16] E. L. Clark, Cannabis Sativa for Health and Hemp, New York: Nova Science Publishers, Incorporated, 2011. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=3022686&query=CannabisSativa++for++Health++and++Hemp>
- [17] T. Woolley, Natural Building Techniques : A Guide to Ecological Methods and Materials, Ramsbury: The Crowood Press, 2022, pp. 175-225. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=6933384>
- [18] R. Pere, Looduslikud ehitusmaterjalid. Seinad, põrandad, katus ja siseviimistlus, Tallinn: AS Ajakirjade Kirjastus, 2008, pp. 64-66.
- [19] A. Arizzi, M. Brümmer, I. Martin-Sanches, G. Cultrone, H. Viles, „The Influence of the Type of Lime on the Hygric Behaviour and Bio-Receptivity of Hemp Lime Composites Used for Rendering Applications in Sustainable New Construction and Repair Works,” Arizzi et al, 2015. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125520>
- [20] C. Magwood, Essential Hempcrete Construction: The Complete Step-by-Step Guide, Canada: New Society Publishers, 2016. Loetud aadressil: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tuee/detail.action?docID=4547884>
- [21] M. Pau, „Kanepibetoonse gude tutvustus ja katsetamine Eesti kliimas,” Tartu ülikooli Viljandi kultuuriakadeemia, Viljandi, 2017.
- [22] FiberFort, „Hemp Benchmarks,” Loetud aadressil: <https://www.hempbenchmarks.com/hemp-market-insider/hempcrete-new-studies-new-applications-new-approaches/>. [Kasutatud aprill 2023]
- [23] I. Bošković ja A. Radivojević, „Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia: The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission,” *Journal of Building Engineering*, kd. 66, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105908>
- [24] O. Kinnane, A. Reilly, J. Grimes, S. Pavia, R. Walker, „Acoustic absorption of hemp-lime construction,” *Construction and Building Materials*, kd. 122, nr 30, pp. 674-682, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>
- [25] QAI Laboratories Ltd, „TEST REPORT #T1007-1,” 8.06.2015. Loetud aadressil: <http://justbiofiber.ca/wp-content/uploads/2015/06/T1007-1-Just-BioFiber->

- Structural-Solutions-HempCrete-Block-Wall-June-8-2015.pdf [Kasutatud aprill 2023]
- [26] L. Gregor, „Performance of Hempcrete Walls Subjected to a Standard Time-temperature Fire Curve,” Victoria University Melbourne, Melbourne, 2014. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/277533751_Performance_of_Hempcrete_Walls_Subjected_to_a_Standard_Time-temperature_Fire_Curve.
- [27] S. K. Baduge, P. Mendis, R. San Nicolas, K. Nguyen, A. Hajimohammadi, „Performance of lightweight hemp concrete with alkali-activated cenosphere binders exposed to elevated temperature,” *Construction and Building Materials*, kd. 224, nr 10, pp. 158-172, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.069>
- [28] T. Koosapoeg, „Kanepibetooni niiskustehnilised omadused: sorptisoon, veeimavus ja veeauruläbivus,” Tallinna Tehnikaülikool Tartu kolledž, Tartu, 2022.
- [29] D. Pappel, „Tööstuslikust kanepist soojusisolatsioonimaterjalide omaduste uurimine,” Eesti Maaülikool, Tartu, 2017.
- [30] K. Anslan, „Tööstuskanepi omaduste uurimine ja kasutusvõimalused ehituses,” Eesti Maaülikool, Tartu, 2015.
- [31] P. Brzyski ja Z. Suchorab, „Capillary Uptake Monitoring in Lime-Hemp-Perlite Composite Using the Time Domain Reflectometry Sensing Technique for Moisture Detection in Building Composites,” *Materials*, kd. 13, nr 7, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13071677>
- [32] C. Moletti, P. Aversa, A.E. Losini, G. Dotelli, M. Woloszyn, V.A.M. Luprano, „Hygrothermal behaviour of hemp-lime walls: the effect of binder carbonation over time,” *Building and Environment*, kd. 233, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110129>
- [33] L.-M. Raado, Ehitusmaterjalid, Tallinn: Sihtasutus Professor Karl Õigeri Stipendiumifond, 2018.
- [34] Keskkonnaministeerium, „Jäätmete liigiti kogumine,” 2023. Loetud aadressil: <https://envir.ee/liigitikogumine>. [Kasutatud aprill 2023].
- [35] Keskkonnaagentuur, „2020. aastal jäätmete käitlus tekkepõhise nimistu järgi,” 2020. Loetud aadressil: https://jats.keskkonnainfo.ee/failid/2020_1_ewc.pdf [Kasutatud aprill 2023]
- [36] Keskkonnaministeerium, "Ehitus- ja lammutusjäätmete käitlusnõuete mõju analüüs," 2015. Loetud aadressil: <https://envir.ee/media/5292/download> [Kasutatud aprill 2023]
- [37] Keskkonnaministeerium, „Jäätmepaketist tulenevad pakendiseaduse muudatused,” 2021. Loetud aadressil: <https://envir.ee/jaatmepaketist-tulenevad-pakendiseaduse-muudatused> [Kasutatud aprill 2023]
- [38] K. Cuevas ja M. Lopez, „The effect of expansive agent and cooling rate in the performance of expanded glass lightweight aggregate as an internal curing agent,” *Construction and Building Materials*, kd. 271, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121505>

- [39] Thermal insulating aggregates. - Stikloporas. Loetud aadressil: <https://stikloporas.com/application/thermal-insulating-aggregates>. [Kasutatud aprill 2023].
- [40] L. Sommariva ja K. Weinberger, „Energy and Natural Resources Saving In The Production of,” *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, kd. 43, pp. 2437-2442, 2015. doi: <https://doi.org/10.3303/CET1543407>
- [41] V. Ducman, A. Mladenović, J.S. Šuput, „Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity,” *Cement and Concrete Research*, kd. 32, nr 2, pp. 223-226, 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00663-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00663-9)
- [42] MSDS Expanded Glass. - Stikloporas, 1.08.2021. Loetud aadressil: https://stikloporas.com/wp-content/uploads/2021/01/msds_stikloporas_en.pdf. [Kasutatud aprill 2023].
- [43] S.K. Adhikary, Z. Rudzionis, „Influence of expanded glass aggregate size, aerogel and binding materials volume on the properties of lightweight concrete,” *Materials Today: Proceedings*, kd. 32, nr 4, pp. 712-718, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.323>
- [44] W. T. M. K. ,. C. F. S. W. Ali Yousefi, „Thermal and Mechanical Properties of Cement Mortar Composite Containing Recycled Expanded Glass Aggregate and Nano Titanium Dioxide,” *Sciences*, kd. 10, nr 7, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/app10072246>
- [45] L. Paunescu, S.M. Axinte, F. Cosmulescu, M.F. Dragoescu, „Granulated Expanded Glass Manufacturing Method Using,” *Journal La Multiapp*, kd. 2, nr 5, pp. 14-57, 2021. doi: <https://doi.org/10.37899/journallamultiapp.v2i5.478>
- [46] H. Viiding, *Eesti mineraalid ja kivimid*, Tallinn: Valgus, 1984, p. 209.
- [47] „EVS-EN 459-1:2015 Ehituslubid. Osa 1: Määratulused, spetsifikatsioon ja vastavuskriteeriumid,” Eesti standardikeskus, 2015.
- [48] J.d.A. Freitas jr., M.d.R.d.M. Maron da Costa, L.V. Artigas, L. Martins, C.R. Sanquetta, „Assessment of the impact of binders in the evolution of carbonation in mortars,” *Construction and Building Materials*, kd. 225, pp. 496-501, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.193>
- [49] „EVS-EN ISO 12570:2000 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of moisture content by drying at elevated temperature,” Eesti standardikeskus, 2000.
- [50] R. Walker ja S. Pavia, „Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes,” *Construction and Building Materials*, kd. 64, pp. 270-276, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>
- [51] C. M. Pederneiras, R. Veiga, J.d. Brito, „Incorporation of Natural Fibres in Rendering Mortars for the Durability of Walls,” *Infrastructures*, kd. 6, nr 6, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures6060082>
- [52] A. Izaguirre, J. Lanas, J.I. Alvarez, „Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars,” *Construction and Building Materials*, kd. 25, nr 2, pp. 992-1000, 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.080>

- [53] I. Torres, G. Matias, P. Faria, „Natural hydraulic lime mortars - The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour,” *Journal of Building Engineering*, kd. 32, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101747>
- [54] E. Altmäe, „Savikrohvi niiskustehniliste omaduste määramine: erinevate savide mõju sorptsioonile ja veeauru läbilaskvusele,” Tallinna Tehnikaülikool Tartu kolledž, Tartu, 2017.
- [55] P. F. G. Banfill, „Hygrothermal properties of NHL mortars,” Conference Report: The 3rd International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings, Visby, pp. 71-79, 2019. Loetud aadressil: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1294137/FULLTEXT01.pdf> [Kasutatud aprill 2023]
- [56] A-L. Karamaa, "Lubjapõhiste soojusisolatsioonikrohvide niiskustehnilised omadused: veeimavus, sorptsioon, veeaurujuhtivus," Tallinna Tehnikaülikool Tartu kolledž, Tartu, 2022

LISAD

Lisa 1 Silindrikujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi kaaluandmed

	Segu tüüp	Katsekeha	Vormikaal, g	Kaalud koos vormiga										
				18.04.2022	20.04.2022	23.04.2022	25.04.2022	27.04.2022	29.04.2022	01.05.2022	02.05.2022	04.05.2022	06.05.2022	09.05.2022
Silindrikujulised katsekehad	Segu A	IA	69,047	438,820	629,324	619,574	617,254	615,804	615,034	614,684	614,714	614,764	615,234	615,214
		IIA	48,525	658,540	647,105	641,655	639,935	639,045	638,465	638,135	638,175	638,245	638,635	639,185
		IIIA	48,525	631,660	623,010	619,060	617,780	617,230	616,900	616,820	616,990	617,200	617,650	617,850
		IVA	48,525	650,220	639,805	635,235	633,535	632,915	632,535	632,385	632,535	632,715	633,195	633,445
	Segu B	IB	48,525	347,170	335,477	323,387	320,097	318,347	316,827	315,617	315,257	314,457	314,517	313,987
		IIB	48,525	342,540	330,570	319,450	316,090	314,280	312,740	311,440	311,070	310,360	310,320	310,430
		IIIB	48,525	364,840	352,206	341,436	337,816	336,076	334,386	333,066	332,656	331,866	331,676	330,966
		IVB	48,525	336,170	323,578	314,338	311,408	309,658	308,308	307,158	306,778	306,088	305,968	305,418
	Segu C	IC	48,525	428,540	415,522	396,632	384,152	372,232	359,112	347,482	342,082	333,752	328,302	320,292
		IIC	48,525	434,860	421,084	400,674	387,804	374,654	360,184	348,024	342,434	334,334	328,974	322,554
		IIIC	48,525	411,570	398,568	380,898	368,758	357,108	344,268	332,468	327,228	319,208	313,848	305,878
		IVC	48,525	446,260	433,662	414,492	401,322	388,902	375,502	363,192	357,472	348,542	342,592	333,862
	Segu D	ID	48,525	227,070	213,870	200,550	192,750	188,650	185,980	183,760	183,200	182,230	182,280	182,050
		IID	48,525	269,200	256,932	239,802	228,092	218,532	210,732	206,092	204,602	202,342	201,082	200,172
		IIID	48,525	276,150	263,211	246,941	236,941	231,661	228,071	225,211	224,301	222,611	221,861	220,311
		IVD	48,525	263,680	251,660	234,640	224,460	219,350	215,940	213,210	212,420	210,830	210,300	209,030
	Segu E	IE	48,525	228,670	216,968	200,388	191,398	174,418	184,438	182,178	181,448	180,308	180,048	179,428
		IIE	48,525	258,800	247,156	229,386	217,756	209,046	202,416	198,266	196,876	194,696	193,646	192,816
		IIIE	48,525	267,470	255,414	237,424	226,424	218,394	213,044	209,314	208,004	205,754	204,434	201,504
		IVE	48,525	224,610	214,560	201,150	195,840	192,970	190,560	188,530	187,950	187,050	187,180	186,840

Lisa 1 järg

Kaalud koos vormiga									
12.05.2022	16.05.2022	19.05.2022	23.05.2022	26.05.2022	30.05.2022	02.06.2022	06.06.2022	09.06.2022	13.06.2022
615,494	615,824	615,854	616,194	616,674	616,974	617,194	617,374	617,604	617,824
639,155	639,405	639,415	639,815	640,265	640,535	640,855	641,005	641,245	641,495
618,000	618,320	618,340	618,760	619,270	619,510	619,740	619,970	620,220	620,410
633,545	633,895	633,915	634,345	634,845	635,125	635,405	635,505	635,765	635,995
313,757	314,047	314,027	314,247	314,777	315,017	315,187	315,227	315,477	315,757
309,720	309,700	309,670	309,820	310,250	310,500	310,630	310,670	310,830	311,070
330,556	330,706	330,676	330,986	331,386	331,636	331,736	332,036	332,146	332,286
305,208	305,338	305,398	305,808	306,168	306,518	306,698	306,888	306,958	307,178
315,012	311,502	309,922	309,342	310,032	310,682	310,862	310,702	310,662	310,502
317,324	313,674	312,244	311,844	312,484	313,154	313,324	313,194	313,124	313,064
300,868	297,528	296,178	295,698	296,478	297,018	297,238	296,978	297,028	296,838
328,152	323,762	321,462	320,512	321,172	321,712	321,982	321,882	321,852	321,722
182,080	182,500	182,330	182,190	182,660	182,940	182,960	182,800	182,760	182,640
198,532	198,752	198,542	198,822	199,352	199,782	199,992	199,892	199,812	199,752
219,681	219,961	219,741	220,011	220,681	221,131	221,421	221,321	221,271	221,241
208,620	208,980	208,810	208,920	209,520	209,960	210,170	210,030	210,020	209,900
179,328	179,748	179,608	179,688	180,168	180,598	180,678	180,558	180,388	180,418
190,776	190,506	190,146	190,356	191,056	191,606	191,826	191,706	191,656	191,696
199,444	199,034	198,604	198,784	199,494	200,024	200,224	200,154	200,034	199,974
186,780	187,220	186,970	187,130	187,650	188,030	188,100	187,960	187,850	187,660

Lisa 2 Prismakujuliste kangide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed

Segu tüüp	Katsekeha	Katsekehade kaalud grammides ilma aluse ja vormita								
		18.04.2022	20.04.2022	23.04.2022	25.04.2022	27.04.2022	29.04.2022	01.05.2022	02.05.2022	04.05.2022
Segu A	I A	463,470	439,962	428,162	426,952	427,212	427,682	428,242	428,602	428,992
	II A	462,300	443,840	425,320	420,290	418,770	418,530	418,710	419,080	419,550
	III A	470,820	447,902	430,242	428,002	427,972	428,612	428,892	429,322	429,722
Segu B	I B	274,030	247,080	233,260	230,130	229,180	228,830	229,010	229,390	229,710
	II B	256,710	233,227	222,587	220,937	220,557	220,667	220,947	221,207	221,537
	III B	254,910	231,795	225,965	224,715	224,385	224,455	224,665	224,905	225,160
Segu C	I C	293,880	263,699	241,109	226,439	217,249	211,529	207,979	207,089	206,069
	II C	297,880	271,855	247,655	233,795	222,445	214,065	208,955	207,555	205,445
	III C	295,000	266,309	242,949	227,469	215,889	209,019	205,259	204,429	203,339
Segu D	I D	166,960	141,305	125,265	115,525	111,565	109,845	109,225	109,215	109,195
	II D	154,440	135,750	117,640	108,920	105,580	104,290	104,050	104,010	104,040
	III D	152,580	131,002	111,552	105,212	103,222	103,002	102,942	102,872	103,042
Segu E	I E	174,780	151,227	131,567	120,397	113,937	110,707	108,887	108,867	108,737
	II E	169,300	148,241	130,921	118,161	110,371	106,551	104,881	104,611	104,511
	III E	167,400	140,446	119,486	114,520	105,646	104,236	103,956	103,846	103,926

Lisa 2 järg

Katsekehade kaalud grammides ilma aluse ja vormita											
06.05.2022	09.05.2022	12.05.2022	16.05.2022	19.05.2022	23.05.2022	26.05.2022	30.05.2022	02.06.2022	06.06.2022	09.06.2022	13.06.2022
429,632	429,952	430,062	430,472	430,532	430,942	431,312	431,572	431,772	431,832	431,922	431,982
420,180	420,490	420,700	421,050	421,030	421,550	421,920	422,190	422,410	422,530	422,760	422,78
430,352	430,882	431,082	431,462	431,492	431,882	432,232	432,522	432,772	432,852	432,882	432,992
230,190	230,360	230,590	230,800	230,970	231,240	231,580	231,800	232,020	232,140	232,240	232,24
222,057	222,337	222,517	222,817	222,787	223,057	223,287	223,487	223,647	223,647	223,767	223,757
225,745	226,265	226,465	226,795	226,765	227,145	227,375	227,635	227,765	227,905	227,935	228,015
206,239	206,049	206,059	206,189	206,029	205,869	206,199	206,529	206,419	206,439	206,429	206,299
204,875	204,145	203,945	204,245	204,105	203,915	204,295	204,585	204,605	204,435	204,445	204,285
203,499	203,619	203,649	203,759	203,559	203,359	203,799	204,029	204,079	203,929	203,829	203,779
109,425	109,425	109,415	109,425	109,235	109,225	109,685	109,855	109,755	109,745	109,745	109,645
104,220	104,190	104,601	104,150	104,160	104,110	104,350	104,690	104,640	104,470	104,570	104,48
103,172	104,372	104,502	104,482	104,432	104,252	104,632	104,842	104,792	104,652	104,662	104,602
108,947	108,717	108,837	108,857	108,617	108,587	108,947	109,177	109,167	109,067	109,087	108,947
104,701	104,541	104,601	104,651	104,551	104,411	104,631	103,901	104,871	104,841	104,851	104,591
104,106	104,856	104,736	104,836	104,766	104,596	104,946	105,126	105,126	104,976	104,986	104,866

Lisa 3 Plaadikujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi kaaluandmed

Segu tüüp	Katsekehad	Vormi kaal, g	Kaalud koos vormiga										
			18.04.2022	20.04.2022	23.04.2022	25.04.2022	27.04.2022	29.04.2022	01.05.2022	02.05.2022	04.05.2022	06.05.2022	09.05.2022
Segu A	I A	264,968	3604,320	3563,740	3507,440	3468,960	3431,67	3390,48	3353,35	3336,39	3309,67	3294,26	3272,95
	II A	265,970	3700,690	3666,153	3623,753	3597,193	3573,203	3548,483	3525,083	3513,393	3493,833	3470,863	3431,643
	III A	265,291	3614,750	3571,357	3521,887	3484,217	3452,447	3419,837	3390,707	3376,857	3353,887	3333,697	3309,347
	IV A	261,390	3647,500	3595,556	3535,506	3488,186	3448,876	3407,636	3372,826	3357,666	3335,756	3320,046	3300,646
Segu B	I B	265,950	2238,120	2184,444	2109,444	2057,784	2011,864	1969,684	1946,684	1939,124	1928,314	1920,954	1908,924
	II B	266,416	2174,630	2126,978	2055,948	2009,918	1968,718	1925,938	1899,948	1891,178	1879,878	1871,188	1858,398
	III B	267,414	2190,150	2145,957	2077,917	2032,817	1988,077	1943,407	1915,527	1906,027	1894,437	1885,657	1872,577
	IV B	266,246	2181,510	2135,086	2060,596	2011,396	1965,576	1924,396	1900,526	1892,216	1881,376	1874,096	1861,896
Segu C	I C	266,066	2519,470	2463,048	2381,658	2327,508	2279,708	2219,788	2162,368	2136,318	2090,658	2048,068	1973,178
	II C	266,746	2525,400	2477,861	2403,291	2355,001	2308,401	2251,441	2195,191	2167,591	2122,061	2075,341	1996,221
	III C	267,402	2446,190	2402,992	2332,792	2289,662	2244,142	2190,832	2138,552	2112,182	2066,442	2025,072	1948,492
	IV C	263,711	2462,790	2404,459	2323,139	2265,249	2212,999	2152,889	2094,239	2068,409	2023,529	1979,259	1900,209
Segu D	I D	267,903	1532,080	1473,365	1396,685	1345,195	1295,955	1245,115	1199,595	1180,425	1149,325	1122,505	1082,855
	II D	264,597	1589,400	1535,845	1465,375	1418,775	1372,135	1321,735	1277,865	1257,565	1222,895	1194,725	1147,685
	III D	264,968	1550,880	1497,572	1427,842	1377,632	1326,492	1272,112	1226,032	1203,482	1167,552	1141,102	1098,392
	IV D	266,675	1602,750	1550,359	1478,409	1427,919	1379,519	1327,509	1279,789	1258,489	1223,119	1189,989	1141,549
Segu E	I E	264,644	1613,830	1541,707	1451,347	1392,967	1332,277	1268,217	1211,957	1185,427	1143,827	1110,127	1058,027
	II E	267,014	1634,750	1568,573	1483,403	1426,973	1366,453	1301,473	1246,613	1219,903	1176,013	1144,183	1090,463
	III E	266,814	1649,840	1582,868	1497,238	1434,048	1370,218	1301,498	1243,468	1214,748	1169,418	1136,968	1086,098
	IV E	263,115	1603,790	1547,959	1471,709	1416,529	1361,959	1302,839	1251,269	1224,649	1180,709	1147,359	1090,679

Lisa 3 järg

Kaalud koos vormiga									
12.05.2022	16.05.2022	19.05.2022	23.05.2022	26.05.2022	30.05.2022	02.06.2022	06.06.2022	09.06.2022	13.06.2022
3258,99	3249,73	3243,18	3238,41	3238,31	3239,02	3239,65	3239,84	3239,92	3240,18
3396,743	3368,053	3351,593	3335,523	3329,713	3326,423	3324,243	3321,083	3318,983	3317,753
3293,097	3281,547	3273,257	3266,027	3264,117	3263,377	3263,077	3262,277	3261,897	3261,907
3288,346	3281,186	3276,556	3275,336	3277,176	3278,386	3279,546	3280,346	3281,106	3281,886
1899,034	1891,214	1884,694	1877,884	1875,914	1874,894	1873,884	1872,394	1871,184	1870,404
1848,878	1841,098	1834,708	1827,778	1825,568	1824,388	1823,358	1821,688	1820,418	1819,528
1862,617	1854,367	1847,627	1840,467	1838,257	1837,177	1836,397	1834,727	1833,647	1832,947
1852,126	1844,356	1837,986	1830,876	1828,436	1827,086	1825,776	1823,936	1822,506	1821,506
1914,658	1859,908	1824,098	1781,758	1764,308	1750,898	1740,358	1727,308	1718,368	1711,708
1935,841	1876,201	1837,411	1790,521	1770,981	1757,111	1746,621	1732,221	1722,881	1715,731
1885,072	1822,472	1782,372	1733,972	1714,632	1700,982	1691,002	1677,102	1669,132	1664,012
1843,229	1791,099	1758,239	1722,069	1706,629	1695,909	1688,619	1678,949	1673,579	1670,419
1058,895	1042,105	1029,875	1021,095	1022,045	1023,615	1025,095	1024,535	1024,795	1025,275
1112,595	1087,575	1070,925	1055,255	1051,165	1050,275	1050,975	1048,645	1048,425	1048,965
1069,282	1049,272	1035,462	1024,612	1024,322	1025,752	1027,062	1026,172	1026,142	1026,232
1110,159	1086,589	1070,549	1056,249	1053,229	1053,659	1054,889	1053,189	1053,179	1053,629
1026,987	1005,997	990,937	978,807	978,117	979,637	981,157	979,987	979,997	980,557
1053,053	1027,593	1011,093	996,363	992,503	991,443	991,813	989,543	989,083	989,463
1049,998	1024,688	1008,358	994,268	991,528	991,628	992,288	991,738	991,478	991,458
1045,419	1013,049	993,729	977,709	973,859	972,849	973,049	971,819	971,459	971,299

Lisa 4 Süsihappegaasi manustamine katsemajas

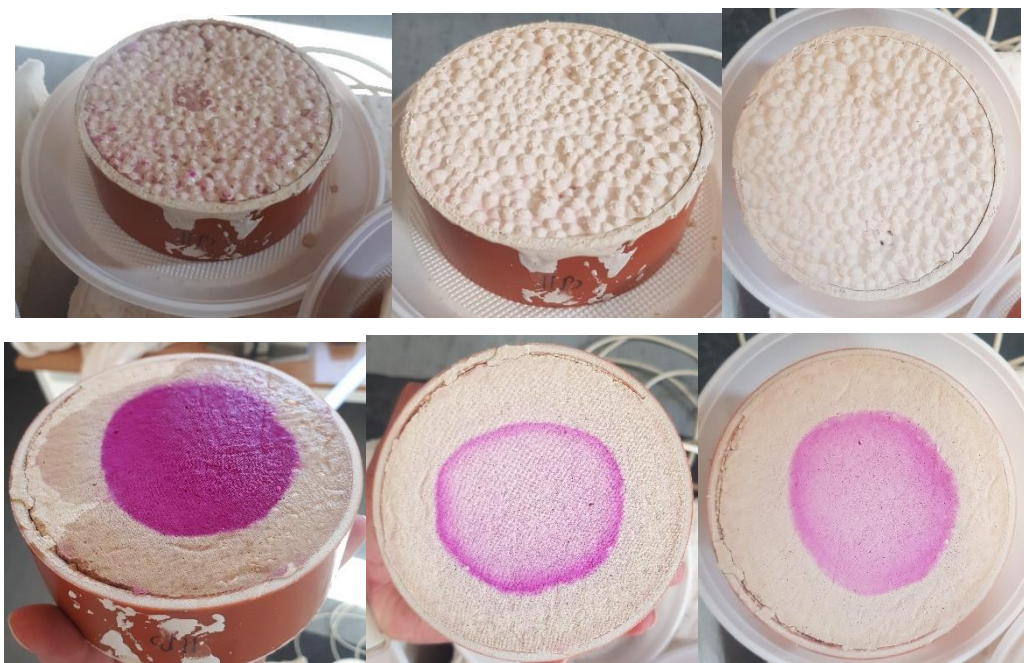
Süsihappegaasi (CO ₂) lisamine karboniseerumisprotsessis		
Kuupäev	Kellaaeg	kestvus, minutites
19.04.2022	16:20	5
20.04.2022	18:35	5
21.04.2022	17:30	5
23.04.2022	12:29	5
25.04.2022	18:07	5
26.04.2022	12:45	10
27.04.2022	18:05	10
28.04.2022	17:30	10
29.04.2022	18:15	10
01.05.2022	17:40	10
02.05.2022	18:10	10
03.05.2022	13:10	10
04.05.2022	12:25	10
05.05.2022	17:25	5
06.05.2022	15:45	5
09.05.2022	18:20	5
12.05.2022	20:22	5
15.05.2022	15:47	5
19.05.2022	12:35	5
20.05.2022	17:15	5
21.05.2022	9:40	5
22.05.2022	20:40	5
23.05.2022	19:15	5
25.05.2022	17:47	5
26.05.2022	18:00	5
30.05.2022	18:22	5
1.06.2022	16:45	5
2.06.2022	18:35	5
6.06.2022	17:42	5
9.06.2022	17:52	5

Lisa 5 Silindrikujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi pildid

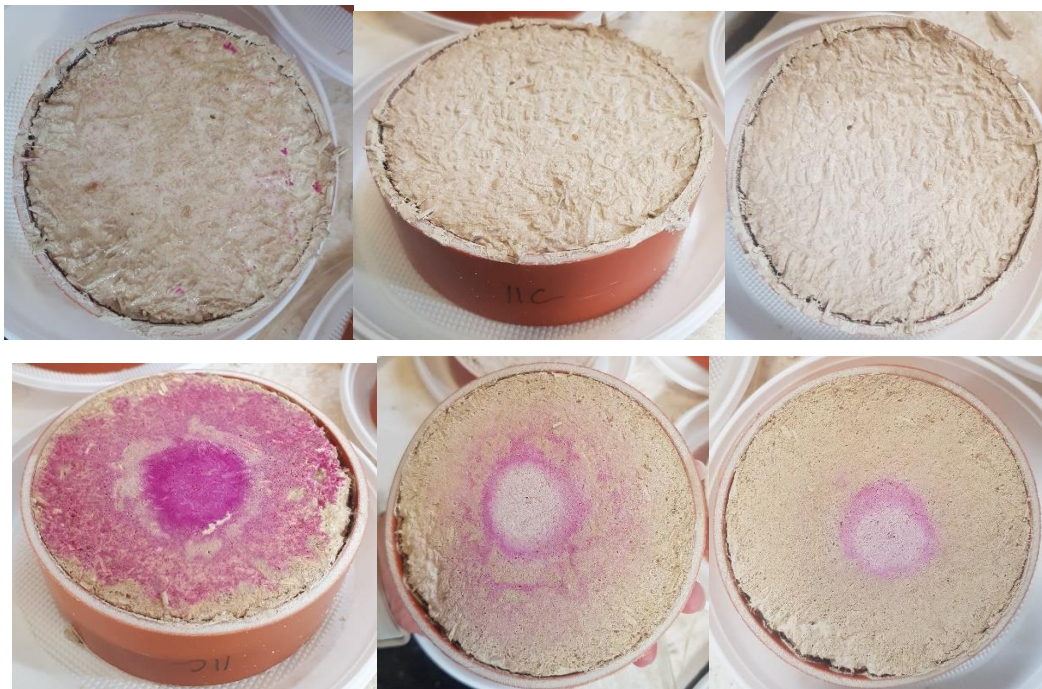
Katsekeha IIA 6. mail 2022, 16. mail 2022, 2. juunil 2022. aastal



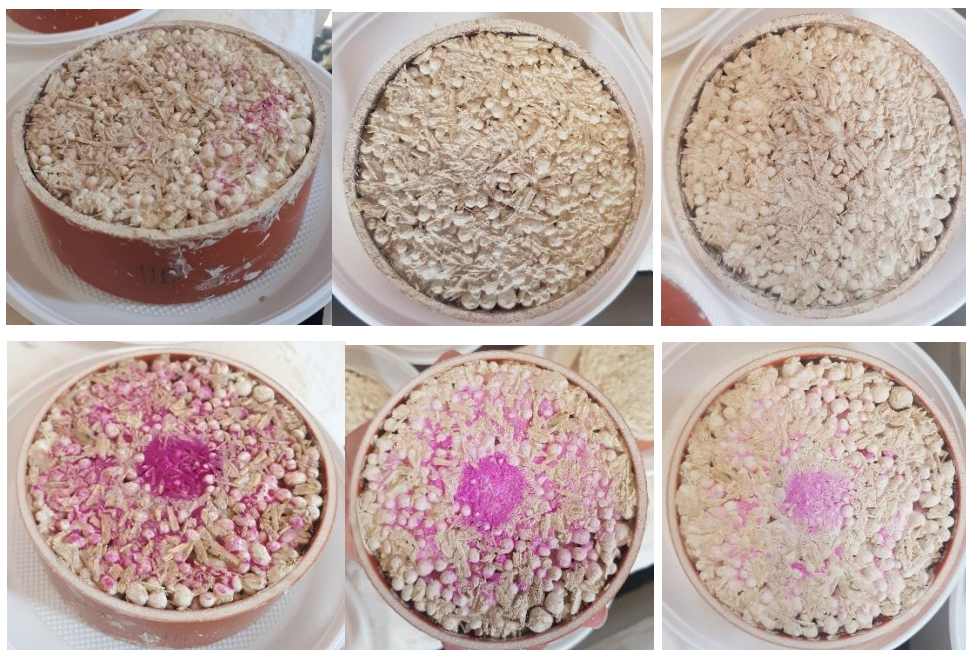
Katsekeha IIB 6. mail 2022, 16. mail 2022, 2. juunil 2022. aastal



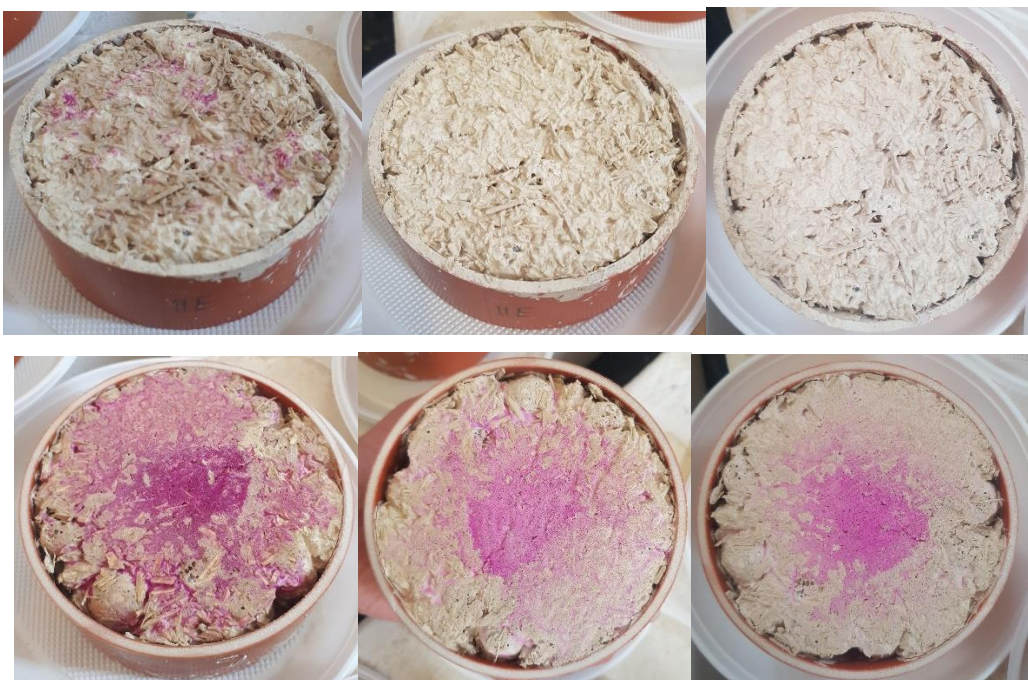
Katsekeha IIC 6. mail 2022, 16. mail 2022, 2. juunil 2022. aastal



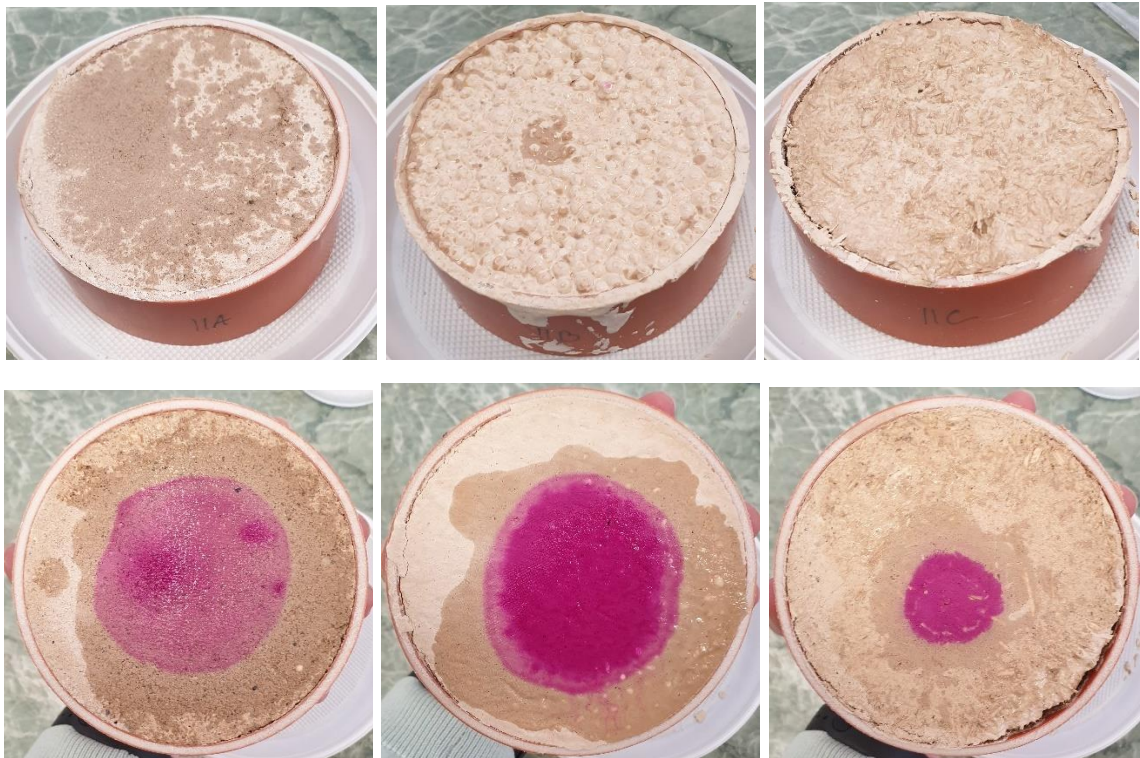
Katsekeha IID 6. mail 2022, 16. mail 2022, 2. juunil 2022. aastal



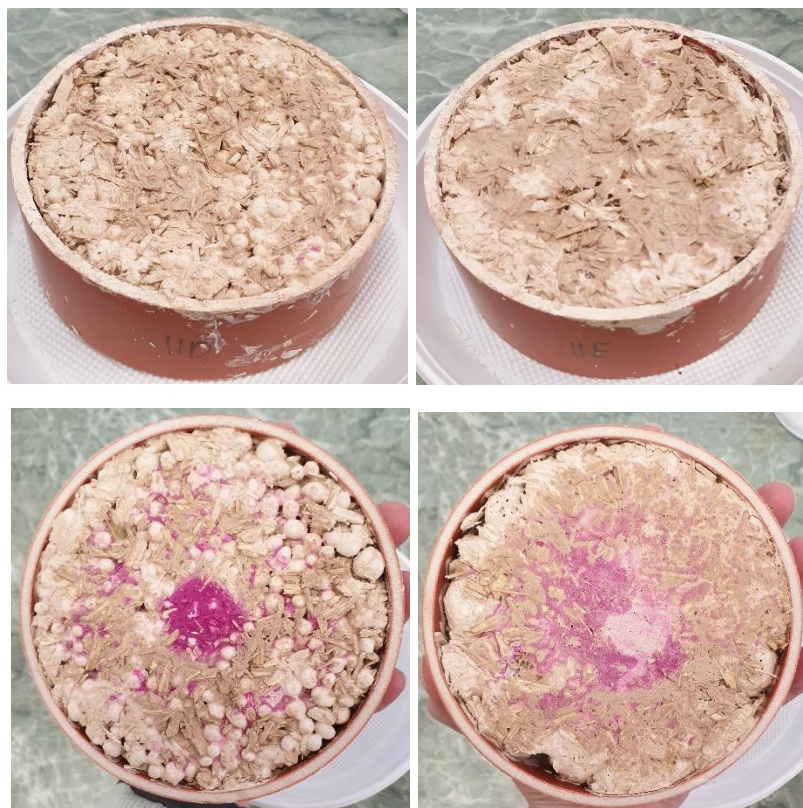
Katsekeha IIE 6. mail 2022, 16. mail 2022, 2. juunil 2022. aastal



Lisa 6 Silindrikujuliste katsekehade pildid 12. jaanuaril



Vasakult: IIA, IIB, IIC



Vasakult: IID, IIE

Lisa 7 Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramise katse kaaluandmed

		Veeimavuse kaaluandmed							
		Katsekeha nr.	Katsekeha pool	Kaal enne katset, g	10min, g	90min, g	4 tundi, g	6 tundi, g	10 tundi, g
Prismakujulised kangid 160 x 40 x 40 mm	IA	1	227,316	234,254	247,285	248,708	248,753	248,868	249,099
		2	213,705	220,603	232,928	233,93	233,991	234,117	234,325
	IIA	1	217,526	225,056	238,313	238,93	238,991	239,088	239,304
		2	212,344	219,982	232,644	233,214	233,277	233,373	233,559
	IIA	1	216,826	224,216	236,605	237,738	237,757	237,887	238,066
		2	224,489	231,904	244,938	246,221	246,292	246,409	246,607
	IB	1	125,267	131,532	141,027	148,686	149,18	149,48	149,882
		2	121,264	127,292	136,339	143,849	144,292	144,471	144,884
	IIB	1	120,326	125,583	133,48	140,95	142,571	142,831	143,331
		2	118,003	123,471	130,893	137,933	139,873	140,098	140,627
	IIIB	1	120,689	126,124	133,603	140,982	142,71	142,997	143,506
		2	121,318	126,756	134,887	142,592	143,622	143,871	144,286
	IC	1	108,818	118,822	133,089	145,245	147,154	148,568	151,284
		2	106,631	117,693	132,217	143,04	144,493	145,876	148,409
	IIC	1	104,087	114,5	128,31	140,04	141,612	142,975	145,486
		2	108,385	118,181	132,117	144,818	147,111	148,613	151,391
	IIIC	1	104,175	115,174	129,913	139,735	141,099	142,388	144,843
		2	108,361	119,129	133,58	145,429	147,164	148,556	151,145
	ID	1	66,533	79,472	92,41	97,348	98,301	99,637	101,844
		2	68,809	84,05	98,809	101,944	102,72	103,899	105,997
	IID	1	66,193	79,872	91,575	95,162	95,886	96,891	98,741
		2	66,681	79,081	92,287	96,603	97,43	98,736	100,732
	IIID	1	68,367	83,406	96,043	99,105	100,02	101,448	103,423
		2	67,727	81,234	92,321	98,196	99,344	100,625	102,717
IE	1	65,873	82,379	99,396	104,458	105,913	107,269	109,686	
	2	66,838	83,019	102,173	106,957	108,053	109,739	112,737	
IIE	1	66,033	83,744	99,549	104,778	106,103	107,957	110,818	
	2	66,169	80,242	96,359	102,95	104,528	106,184	108,842	
IIIE	1	67,026	87,282	104,056	108,068	109,54	111,192	113,772	
	2	63,903	77,993	89,658	95,753	97,256	98,79	101,291	

Lisa 8 t-testi näide veemavuse segu gruppide A ja B vahel

<i>Veeimavus</i>	<i>segu A</i>	<i>segu B</i>
Keskmine	1,2783	0,824517
Dispersioon	0,000236	0,007945
kaitseid	3	3
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	8,689257	
P(T<=t) one-tail	0,006494	
t Critical one-tail	2,919986	
p-väärtus	0,013	p-value
t Critical two-tail	4,302653	

Lisa 9 Adsorptsiooni katse kaaluandmed

Adsorptsiooni katse katsekehade kaal grammides															
Segu	Katse-kehad	Kuivatatud	34%	30%	30%	30%	30%	50%	50%	50%	50%	50%	75%	75%	75%
		16.jaan	17.jaan	18.jaan	19.jaan	20.jaan	21.jaan	22.jaan	23.jaan	24.jaan	25.jaan	26.jaan	27.jaan	28.jaan	29.jaan
Segu A	IA	550,843	551,183	551,204	551,176	551,187	551,174	551,378	551,406	551,433	551,435	551,468	551,875	551,908	551,995
	IIA	595,134	595,454	595,512	595,488	595,478	595,492	595,693	595,752	595,772	595,800	595,802	596,172	596,275	596,320
	IIIA	573,736	574,059	574,098	574,075	574,077	574,070	574,252	574,283	574,295	574,310	574,321	574,660	574,773	574,839
	IVA	589,243	589,591	589,622	589,582	589,583	589,565	589,788	589,809	589,823	589,838	589,846	590,279	590,347	590,426
Segu B	IB	268,341	268,621	268,626	268,592	268,607	268,604	268,756	268,779	268,797	268,803	268,797	269,186	269,267	269,332
	IIB	263,663	263,964	263,994	263,977	263,994	264,001	264,195	264,239	264,257	264,278	264,303	264,689	264,780	264,841
	IIIB	284,921	285,199	285,226	285,191	285,204	285,190	285,374	285,380	285,416	285,419	285,433	285,843	285,919	285,960
	IVB	259,655	259,911	259,936	259,908	259,908	259,910	260,067	260,074	260,086	260,111	260,111	260,513	260,576	260,638
Segu C	IC	258,679	259,516	259,853	259,889	259,929	259,903	260,495	260,717	260,803	260,850	260,880	261,803	262,158	262,400
	IIC	261,370	262,185	262,519	262,557	262,608	262,601	263,164	263,366	263,475	263,523	263,547	264,501	264,865	265,145
	IIIC	245,274	246,048	246,377	246,430	246,455	246,458	246,990	247,194	247,293	247,337	247,369	248,256	248,598	248,904
	IVC	269,665	270,527	270,876	270,919	270,941	270,955	271,561	271,872	271,872	271,890	271,942	272,892	273,261	273,499
Segu D	ID	131,696	132,539	132,637	132,588	132,591	132,591	133,077	133,141	133,174	133,182	133,206	134,005	134,192	134,303
	IID	148,602	149,462	149,634	149,595	149,602	149,598	150,119	150,231	150,282	150,294	150,306	151,232	151,483	151,622
	IIID	169,707	170,491	170,732	170,723	170,728	170,735	171,268	171,397	171,452	171,481	171,486	172,323	172,600	172,756
	IVD	158,529	159,361	159,589	159,548	159,555	159,549	160,131	160,219	160,270	160,291	160,306	161,143	161,420	161,563
Segu E	IE	129,045	129,958	130,128	130,073	130,073	130,069	130,662	130,734	130,757	130,778	130,782	131,760	131,990	132,127
	IIE	140,233	141,223	141,399	141,360	141,358	141,357	141,991	142,078	142,119	142,143	142,166	143,175	143,497	143,662
	IIIE	148,098	149,111	149,334	149,296	149,300	149,303	149,961	150,060	150,130	150,148	150,166	151,186	151,470	151,654
	IVE	136,150	137,153	137,317	137,257	137,255	137,248	137,833	137,963	138,017	138,027	138,053	139,055	139,323	139,468

Lisa 9 järg

Adsorptsiooni katse katsekehade kaal grammides														
Segu	Katse-kehad	75%	75%	75%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
		30.jaan	31.jaan	01.veebr	02.veebr	03.veebr	04.veebr	05.veebr	06.veebr	07.veebr	08.veebr	09.veebr	10.veebr	11.veebr
Segu A	IA	552,064	552,133	552,182	553,155	553,530	553,785	553,978	554,164	554,364	554,492	554,601	554,733	554,902
	IIA	596,390	596,402	596,457	597,638	597,931	598,501	598,773	599,061	600,281	600,716	601,098	601,113	604,010
	IIIA	574,902	574,944	574,999	575,808	576,144	576,373	576,539	576,730	576,863	577,014	577,115	577,226	577,337
	IVA	590,480	590,529	590,593	591,502	591,881	592,118	592,352	592,528	592,697	592,875	592,996	593,136	593,303
Segu B	IB	269,395	269,428	269,473	270,651	270,952	271,140	271,335	271,488	271,620	271,793	271,876	271,990	272,118
	IIB	264,887	264,941	265,015	266,193	266,503	266,690	266,907	267,058	267,146	267,326	267,412	267,528	267,642
	IIIB	286,035	286,079	286,124	287,229	287,565	287,752	287,936	288,077	288,165	288,334	288,416	288,527	288,664
	IVB	260,703	260,759	260,799	261,994	262,326	262,541	262,768	262,916	263,049	263,221	263,316	263,456	263,600
Segu C	IC	262,618	262,757	262,886	265,571	267,144	268,161	268,945	269,545	270,135	270,643	270,993	271,351	271,805
	IIC	265,335	265,465	265,614	268,438	270,043	271,100	271,918	272,547	273,184	273,721	274,055	274,405	274,794
	IIIC	249,024	249,164	249,286	251,789	253,260	254,279	255,081	255,667	256,240	256,740	257,129	257,481	257,822
	IVC	273,701	273,864	274,004	276,881	278,512	279,549	280,369	281,039	281,688	282,189	282,561	282,883	283,299
Segu D	ID	134,372	134,429	134,469	136,761	137,779	138,403	138,894	139,234	139,599	139,913	140,124	140,343	140,593
	IID	151,701	151,823	151,888	154,572	155,761	156,530	157,060	157,525	157,980	158,374	158,592	158,849	159,111
	IIID	172,903	172,986	173,071	175,178	176,109	176,764	177,279	177,674	178,052	178,405	178,648	178,895	179,137
	IVD	161,715	161,797	161,876	164,107	165,159	165,761	166,301	166,684	167,057	167,409	167,613	167,804	168,067
Segu E	IE	132,226	132,288	132,373	134,841	135,976	136,638	137,230	137,604	137,991	138,336	138,610	138,858	139,196
	IIIE	143,774	143,888	143,987	146,871	148,187	149,015	149,707	150,178	150,632	151,098	151,348	151,633	151,944
	IIIE	151,757	151,879	151,977	154,404	155,513	156,253	156,797	157,236	157,675	158,129	158,367	158,612	158,842
	IVE	139,587	139,654	139,730	142,065	143,098	143,817	144,467	144,938	145,392	145,796	146,098	146,387	146,657

Lisa 10 Desorptsiooni katse kaaluandmed

Segu	Katse-kehad	Desorptsiooni katse katsekehade kaalud grammides												
		95%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	50%	50%	50%	50%
		11.veebr	12.veebr	13.veebr	14.veebr	15.veebr	16.veebr	17.veebr	18.veebr	19.veebr	20.veebr	21.veebr	22.veebr	
Segu A	IA	554,902	553,918	553,659	553,566	553,569	553,581	553,609	553,631	553,232	553,168	553,166	553,186	
	IIA	604,010	601,947	601,042	600,388	599,906	599,518	599,245	599,059	598,363	598,026	597,849	597,776	
	IIIA	577,337	576,580	576,355	576,273	576,282	576,290	576,316	576,340	575,992	575,926	575,918	575,929	
	IVA	593,303	592,328	592,078	592,026	592,042	592,061	592,093	592,128	591,729	591,686	591,688	591,7	
Segu B	IB	272,118	270,959	270,803	270,788	270,819	270,848	270,881	270,924	270,583	270,561	270,568	270,588	
	IIB	267,642	266,542	266,306	266,260	266,279	266,294	266,327	266,363	266,021	265,983	265,990	266,002	
	IIIB	288,664	287,560	287,348	287,317	287,328	287,357	287,401	287,437	287,089	287,055	287,060	287,078	
	IVB	263,600	262,361	262,229	262,232	262,268	262,299	262,344	262,392	262,047	262,037	262,047	262,044	
Segu C	IC	271,805	268,576	267,226	266,535	266,121	265,914	265,763	265,687	264,454	263,876	263,566	263,406	
	IIC	274,794	271,542	270,141	269,393	268,965	268,74	268,591	268,51	267,232	266,671	266,369	266,208	
	IIIC	257,822	254,785	253,448	252,763	252,367	252,144	252,007	251,916	250,713	250,152	249,847	249,685	
	IVC	283,299	279,923	278,499	277,766	277,345	277,094	276,936	276,848	275,582	274,967	274,643	274,471	
Segu D	ID	140,593	138,016	137,509	137,340	137,265	137,243	137,235	137,252	136,262	136,058	135,981	135,923	
	IID	159,111	156,126	155,42	155,135	155,012	154,956	154,941	154,959	153,85	153,607	153,526	153,495	
	IIID	179,137	176,859	176,312	176,055	175,934	175,868	175,834	175,835	174,869	174,528	174,388	174,330	
	IVD	168,067	165,681	165,139	164,933	164,847	164,819	164,824	164,844	163,765	163,509	163,411	163,376	
Segu E	IE	139,196	136,537	135,956	135,762	135,706	135,685	135,694	135,730	134,546	134,327	134,260	134,203	
	IIE	151,944	148,679	148,005	147,769	147,687	147,671	147,683	147,715	146,469	146,239	146,167	146,139	
	IIIE	158,842	156,08	155,498	155,264	155,168	155,122	155,103	155,103	153,996	153,624	153,504	153,441	
	IVE	146,657	144,250	143,641	143,407	143,339	143,303	143,307	143,329	142,148	141,869	141,760	141,694	

Lisa 10 järg

Segu	Katse-kehad	Desportsiooni katse katsekehade kaalud grammides				
		30%	30%	30%	30%	Kuivkaal
		23.veebr	24.veebr	25.veebr	26.veebr	01.märts
Segu A	IA	552,863	621,796	621,749	552,679	552,151
	IIA	597,400	645,738	645,658	597,113	596,491
	IIIA	575,647	624,013	623,985	575,450	574,917
	IVA	591,361	639,749	639,721	591,185	590,639
Segu B	IB	270,331	318,797	318,787	270,249	269,806
	IIB	265,773	314,178	314,170	265,691	265,232
	IIIB	286,817	335,253	335,246	286,733	286,262
	IVB	261,779	310,213	310,215	261,700	261,253
Segu C	IC	262,662	310,843	310,661	262,030	259,863
	IIC	265,463	313,576	313,400	264,841	262,649
	IIIC	248,994	297,155	296,970	248,363	246,271
	IVC	273,709	321,850	321,657	273,059	270,805
Segu D	ID	135,262	183,629	183,577	135,022	133,542
	IID	152,816	201,115	201,019	152,504	150,805
	IIID	173,669	221,950	221,817	173,238	171,359
	IVD	162,653	210,950	210,840	162,283	160,488
Segu E	IE	133,417	181,730	181,686	133,148	131,444
	IIE	145,313	193,598	193,515	144,972	143,141
	IIIE	152,647	200,866	200,739	152,164	150,133
	IVE	140,848	189,084	189,015	140,485	138,620

Lisa 11 Veeauruläbivuse katse kaaluandmed

Veeauruläbivuse kaaluandmed koos vormiga

Segu tüüp	Katse-kehad	algkaal	02.03.2023	03.03.2023	04.03.2023	05.03.2023	06.03.2023	07.03.2023	08.03.2023	09.03.2023	10.03.2023	11.03.2023	12.03.2023	14.03.2023
Segu A	IA	1146,762	1146,434	1146,002	1145,574	1145,143	1144,735	1144,348	1144,007	1143,664	1143,319	1142,991	1142,648	1142,305
	IIA	1166,906	1166,915	1166,617	1166,248	1165,834	1165,428	1165,042	1164,700	1164,365	1164,022	1163,694	1163,384	1163,082
	IIIA	1155,265	1154,678	1153,911	1153,131	1152,349	1151,612	1150,959	1150,385	1149,851	1149,353	1148,892	1148,473	1148,121
	IVA	1162,922	1162,504	1161,914	1161,327	1160,757	1160,236	1159,753	1159,338	1158,941	1158,556	1158,183	1157,826	1157,472
Segu B	IB	841,941	841,772	841,469	841,150	840,787	840,433	840,090	839,761	839,422	839,089	838,753	838,425	838,112
	IIB	834,931	834,735	834,396	834,039	833,666	833,284	832,935	832,588	832,233	831,885	831,548	831,201	830,871
	IIIB	855,588	855,402	855,068	854,726	854,358	853,988	853,643	853,301	852,954	852,613	852,280	851,945	851,611
	IVB	840,695	840,479	840,110	839,742	839,334	838,938	838,571	838,199	837,835	837,462	837,109	836,753	836,416
Segu C	IC	828,668	829,022	828,710	828,226	827,647	827,026	826,434	825,820	825,195	824,561	823,942	823,298	822,666
	IIC	839,477	839,696	839,286	838,732	838,123	837,489	836,871	836,230	835,603	834,964	834,328	833,688	833,066
	IIIC	800,002	800,223	799,859	799,319	798,708	798,062	797,427	796,790	796,156	795,512	794,875	794,227	793,586
	IVC	867,759	868,001	867,573	866,984	866,312	865,634	864,977	864,325	863,646	862,973	862,330	861,653	860,995
Segu D	ID	714,477	714,011	713,064	711,908	710,779	709,702	708,666	707,674	706,684	705,760	704,859	703,844	702,871
	IID	735,466	735,139	734,221	733,217	732,185	731,159	730,171	729,180	728,208	727,255	726,349	725,461	724,609
	IIID	758,853	758,846	758,184	757,432	756,649	755,858	755,109	754,340	753,597	752,855	752,146	751,416	750,718
	IVD	754,462	754,245	753,418	752,541	751,632	750,734	749,876	749,023	748,168	747,341	746,553	745,754	744,996
Segu E	IE	718,178	718,128	717,403	716,596	715,779	714,985	714,237	713,490	712,741	711,994	711,277	710,550	709,827
	IIE	745,868	745,792	745,048	744,219	743,404	742,596	741,826	741,060	740,298	739,526	738,788	738,052	737,326
	IIIE	752,504	752,706	752,102	751,339	750,492	749,649	748,841	748,036	747,239	746,439	745,677	744,901	744,144
	IVE	715,376	715,465	714,776	714,005	713,207	712,406	711,642	710,869	710,082	709,282	708,515	707,723	706,944