



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Tartu kolledž

**LUBJAPÕHISTE
SOOJUSISOLATSIOONKROHVIDE
NIISKUSTEHNILISED OMADUSED: VEEIMAVUS,
SORPTSIOON, VEEAURUJUHTIVUS**

**HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF LIME-BASED
THERMAL INSULATION PLASTERS: WATER
ABSORPTION, SORPTION, WATER VAPOUR
PERMEABILITY**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ave-Ly Kaeramaa

Üliõpilaskood 177486EAEI

Juhendaja: Aime Ruus, dotsent (direktor)

Tartu 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ave-Ly Kaeramaa

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Lubjapõhiste soojusisolatsioonkrohvide niiskustehnilised omadused: veeimavus, sorptsioon, veeaurujuhtivus“ „Hygrothermal performance of lime-based thermal insulation plasters: water absorption, sorption, water vapour permeability“, 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)

¹ 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.

TalTech Tartu kolledž

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ave-Ly Kaeramaa, 177486EAEI
Õppekava, peeriala: EAEI02/17, Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine
Juhendaja(d): Aime Ruus, dotsent (direktor), +372 53 40 28 23
Konsultant:(nimi, amet)
..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

„Lubjapõhiste soojusisolatsioonkrohvide niiskustehnilised omadused: veeimavus, sorptsioon, veeaurujuhtivus“

„Hygrothermal performance of lime-based thermal insulation plasters: water absorption, sorption, water vapour permeability“

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida karboniseerumise mõju niiskustehnilistele omadustele
2. Uurida krohvide niiskustehnilisi omadusi ja erinevate lisaainete mõju niiskustehnilistele omadustele

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade	06.04.22
2.	Katsete teostus	12.05.22
3.	Tulemused, analüüs ja kokkuvõte	17.05.22

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: Ave-Ly Kaeramaa ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	8
1.1. Lubi kui sideaine. Ajalugu	8
1.1.1. Koostis ja valmistamine	8
1.1.2. Kasutamine	10
1.2. Soojusisolatsioonkrohv.....	13
1.3. Hoone niiskustehniline toimivus	16
1.3.1. Niiskus õhus.....	16
1.3.2. Niiskuslevi ja ehitusmaterjalide omadused	16
1.3.3. Niiskuskahjustused ja -deformatsioonid.....	19
1.4. Soojusisolatsioonkrohvides kasutatavad koostisosad	20
2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED	21
3. MATERJAL JA METOODIKA.....	22
3.1. Katsekehades kasutatud materjal.....	22
3.2. Katsekehade valmistamise meetoodika	23
3.2.1. Mörtide valmistamine.....	23
3.2.2. Katsekehade hoidmine ja karboniseerumisprotsess.....	25
3.3. Katsete läbiviimise meetoodika	27
3.3.1. Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine	27
3.3.2. Hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine.....	28
3.3.3. Veeauru läbilaskvuse määramine	29
4. TULEMUSED	30
4.1. Karboniseerumisprotsess ja kuivtihedus	30
4.2. Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine	36
4.3. Hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine.....	40
4.4. Veeauru läbilaskvuse määramine	49
5. ARUTELU	52
5.1. Krohvide niiskustehnilised omadused ja lisaainete mõju niiskustehnilistele omadustele.....	52
5.1. Karboniseerumise mõju niiskustehnilistele omadustele.....	57
KOKKUVÕTE.....	60
SUMMARY	61
KASUTATUD KIRJANDUS	63
LISAD	67

Joonis L3.2.1 Tootja krohvide segamise juhend	67
Tabel L3.2.1 Süsihappegaasi manustamine õhku karboniseerumisprotsessil	68
Tabel L4.1.1 CO ₂ -ga rikastatud krohvide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed.....	69
Tabel L4.1.2 CO ₂ -ga rikastamata krohvide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed.....	70
Joonis L3.3.1 Katsekehad kuivatuskapis enne veeimavuse katset.....	71
Joonis L3.3.2 Katsekehad vees veeimavuskatsel	72
Joonis L3.3.3 Katsekehad kliimakambris sorptsiooni katsel.....	73
Joonis L3.3.4 Katsekehad kliimakambris veeauruläbivuse katsel.....	74
Tabel L4.2.1 CO ₂ -ga rikastatud krohvide veeimavuse kaaluandmed	75
Tabel L4.2.2 CO ₂ -ga rikastamata krohvide veeimavuse kaaluandmed.....	76
Tabel L4.3.1 CO ₂ -ga rikastatud krohvide adsorptsiooni kaaluandmed	77
Tabel L4.3.2 CO ₂ -ga rikastamata krohvide adsorptsiooni kaaluandmed.....	78
Tabel L4.3.3 CO ₂ -ga rikastatud krohvide desorptsiooni kaaluandmed	79
Tabel L4.3.4 CO ₂ -ga rikastamata krohvide desorptsiooni kaaluandmed.....	80
Tabel L4.4.1 CO ₂ -ga rikastatud krohvide veeauruläbivuse kaaluandmed.....	81
Tabel L4.4.2 CO ₂ -ga rikastamata krohvide veeauruläbivuse kaaluandmed...	82

SISSEJUHATUS

Vastavalt Euroopas kehtestatud direktiividele keskendutakse üha enam inimtekkelise saaste vähendamisele. Kuna ehitussektor ja inimeste eluks vajalikud tingimused nõuavad väga suurt energiatarvet, kaasatakse üha enam uuringuid, et vähendada liigset ressursside kasutamist.

Materjaliteadus on üks ehitussektori oluline lüli, mistõttu pannakse üha enam rõhku ka ehitusmaterjalide tootearendusele. Ehitusmaterjalide areng aitab vähendada nii hoone ehitusele kui ka hilisemale ekspluatatsioonile kuluvat energiatarbimist.

Käesolev uurimistöö keskendub lubjapõhiste soojusisolatsioonkrohvide arendamisele. Väikese soojuserijuhtivusega krohve on tänaseks vähe arendatud. Uute hoonete ehitamisel on võimalik rakendada ehituse algstaadiumist alates teadmisi, et vähendada selle negatiivset mõju keskkonnale. Ajaloolised hooned on aga sageli suure energiatarbimisega ekspluatatsioonil ja piiratud võimalustega selle vähendamiseks. Euroopas on ajalooliste hoonete maht ca 26%, kohati isegi 27-38% [1]. Tänu pidevale arengule ja uurimustele on võimalik ära siduda uudsed teadmised ajalooliste võtetega ehitussektoris. Soojusisolatsioonkrohvide arendamine annab inimkonnale võimaluse renoveerida ajaloolisi hooned, mille tulemusena saab märkimisväärselt vähendada nende energiatarbimis kulusid.

Hoone ehitusel ja renoveerimisel on aga oluline järgida selle terviklikku toimivust. Kuna niiskusest põhjustatud kahjustused hõlmavad keskkonnamõjudest ligi 80% [2], on oluline pöörata rõhku hoone niiskustehnilisele toimivusele. Ajalooliste hoonete renoveerimisel on oluline sobitada kokku vana ja uudne tehnoloogia. Seetõttu uuritakse käesolevas töös krohvide niiskustehnilisi omadusi.

Uuringusse on kaasatud viis sarnase koostisega soojusisolatsioonkrohvi. Krohvidest valmistatud katsekehadega läbitakse kolm erinevat niiskustehnilist katset: kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine, hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine ja veeauru läbilaskeomaduste määramine. Kuna kõikides krohvides on oluline koostisosa lubisideaine, uuritakse krohvide karbonaatset kivinemist ning selle mõju krohvide niiskustehnilistele omadustele. Lisaks võrreldakse krohve omavahel, et jõuda selgusele erinevate lisaainete mõjus krohvidele.

Võtmesõnad: lubisideaine, süsihappegaas, soojusisolatsioonkrohv, niiskus, magistritöö

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Lubi kui sideaine. Ajalugu

1.1.1. Koostis ja valmistamine

Lubi kui sideaine on Eestis teada-tuntud pea tuhatkond aastat, mis on lisaks savile ja kipsile üks vanimaid sideaineid ehituses. Sideaine tootmise aluseks on lubjakivi ehk paas. [3]

Lubjakivi koostis

Lubjakivi on üks maavara liik, mille määravad omadused on 2005. aasta maapõueseaduse ja normatiivdokumentide alusel järgmised: kaltsiidi (CaCO_3) sisaldus karbonaatses osas $>50\%$, MgO sisaldus kivimis $\leq 14\%$, lahustumatu jääk kivimis $\leq 25\%$. [4]

Lubjakivi on enamasti heledat tooni settekivim, mille põhikomponent on kaltsiit. Oma olemuselt jaotatakse lubjakivi alamrühmadesse vastavalt tekkele, terajämedusele ja lisanditele. Tekke päritolu põhjal on lubjakivi kas organogeenne või biokeemiline. Organogeenne lubjakivi on kivististerikas ja detriidiline, biokeemiline lubjakivi on aga kivististevaene. [5]

Terajämeduse alusel liigitatakse lubjakivid nelja kategooriasse: peitkristallilised (alla 0,01 mm), mikrokristallilised (0,01-0,1 mm), peeneteralised (0,1-1 mm) ja jämedateralised (üle 1 mm). [5]

Lubjakivis leiduvate lisandite ning nende koguse alusel liigitatakse lubjakivid savikaks, aleuriidikaks, dolomiidikaks (lisandi hulk 10-25%) ja aleuriit-, liiva-, dolomiit-, glaukoniitlubjakiviks (lisandi hulk üle 25%). Lisakomponendid võivad olla dolomiit, savimineraalid, purdmineraalid (kvarts, päevakivid), autigeensed mineraalid (glaukoniit, püriit, opaal, barüüt, raudoksiidid ja hüdroksiidid). [5]

Kaltsiidi (CaCO_3) kui põhikomponendi koostis lubjakivis on enamasti 50-100% ning rohkem kui 90% kogu maailmas leiduvast kaltsiidist on lubjakivis. Kaltsiidi hulk Eesti settekivimites on väga suur, mis võrreldes kvartsiga on üks enamlevinumaid mineraale. Kaltsiidi tihedus on 2,7-2,9 ja tugevus Mohsi skaalal on 3. Kaltsiit ise on kaksikmurdumisega kristallselge mineraal, kuid selles olevate lisandite hulk võib esile tuua erinevaid värvitoone. Seega võib lubjakivis kohata ka halli, roosat, rohekat, sinakat jms toone. [6]

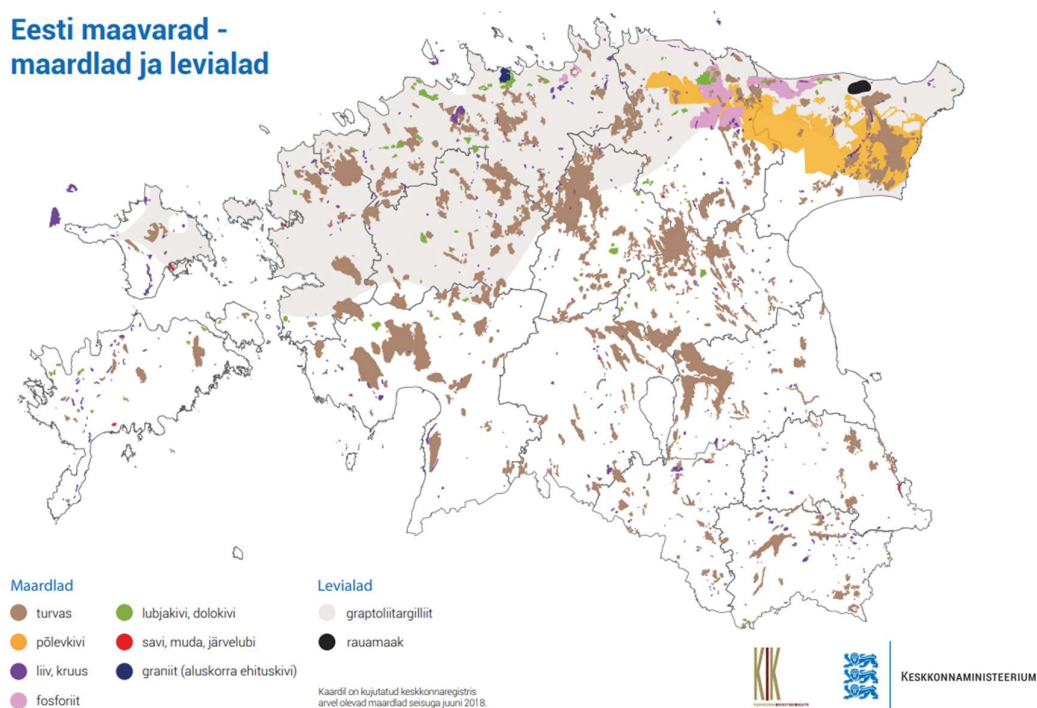
Kaltsiidi sisalduse hulk lubjakivis määrab ära selle puhtusastme ja kvaliteedi, sest tänu kaltsiidi keemilistele reaktsioonidele leiab lubjakivi sedavõrd suurt kasutust. [6]

Sideaine tootmine jaguneb erinevateks etappideks, millest põhilised on tooraine hankimine ja ettevalmistus, soojuslik töötlus(põletamine, kustutamine) ning saaduse jahvatamine. [7]

Lubjakivi kaevandamine

Enamik lubjakivist on Ordoviitsiumi, Siluri ja Devoni ladestus, kuigi Devoni lubjakivikiht on pigem harv nähtus. Lubjakivi levik ja ligipääsetavus Eestis on erinev. Suures pildis võib tõmmata Pärnu-Mustvee vahele joone. Joonest põhjapoolel on lubjakivi kergemini kättesaadav, seevastu lõunapoolel peab selleks minema sügavamale maapõue. [6]

2010. aasta seisuga on tsemendi- ja tehnoloogilise lubjakivi maardlate arv 23, ehituslubjakivi maardlate arv 41 [8]. 2018. aasta seisuga keskkonnaregistris olevad maardlad on kajastatud Joonisel 1.1.1 [9].



Joonis 1.1.1 Eesti maavarad - maardlad ja levialad [9]

Lubjakivi põletamine

Kaevandatud ja ettevalmistatud lähteaine lagundatakse termilise töötuse abil. Lubjakivi põletatakse temperatuuril, mis on vähemalt 900 °C. Täpsem töötlemiseks vajalik temperatuurivahemik sõltub lubjakivi koostisest ja lisandite hulgast. Termiliseks töötuseks kasutatakse nii šaht- pöörd- kui ka keevkihtahjusid. [7]

Põletamise käigus leiab aset keemiline reaktsioon $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Selle reaktsiooniga eraldub kaltsiumkarbonaadist süsihappegaas ning saaduseks on kaltsiumoksiid (põletatud/kustutamata lubi). [6]

Olenevalt lubjakivi keemilisest koostisest tekib põletamisel kas õhklubi või hüdrauliliste omadustega lubi. Õhklubi jaguneb kaheks alaliigiks: kaltsiumiline ja dolomiitne lubi. Hüdraulilise lubja tekke määrab ära savikate lisandite hulk lubjakivis, kus lisaks põlemistsüklile toimuvad reaktsioonid lagunenedu ainete oksiidide vahel, mille saaduseks on madalaaluselised ühendid. Hüdrauliliste omadustega lubi jaguneb kolmeks alaliigiks: looduslik hüdrauliline lubi, vääristatud lubi ja hüdrauliline lubi. [7]

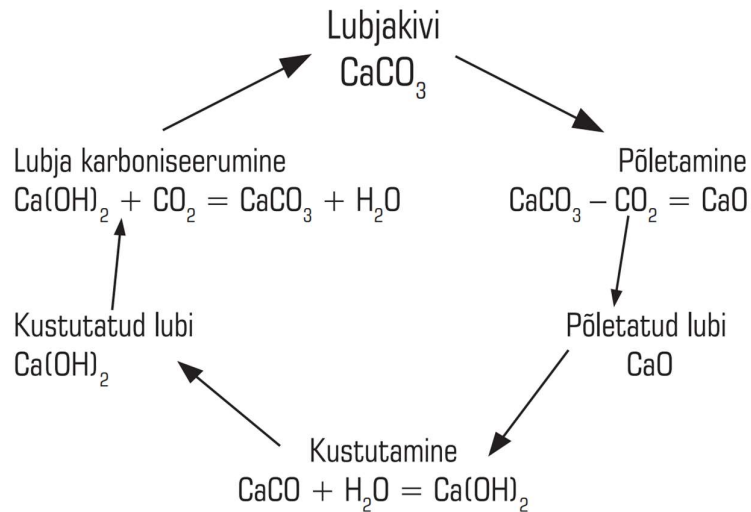
Lubja kustutamine

Põletamisele järgneb lubja kustutamine, millega lisatakse lubjale kindel kogus vett. Selle käigus leiab aset reaktsioon $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ [7]. Reaktsiooni käigus eraldub soojus, mille tulemusena tõuseb lisatud vee temperatuur ja vesi osaliselt aurustub. [10] Olenevalt lisatud vee kogusest on reaktsiooni lõpp-produktiks kaltsiumhüdroksiid ehk hüdraatlubi (kustutatud lubi) kuivsideaine või lubjapasta/-piim [7].

1.1.2. Kasutamine

Lubjakivi on Eestis kasutusel olnud juba aastatuhandeid (algusega 5000-4000 aastat e.m.a), kuid pikalt kasutati seda maavara vaid linnusemüüride ladumisel ja asulate kindlustamisel [11]. Vanimad teadaolevad vallid on loodud Aasva, Kaali ja Ridala asulate kaitsmiseks. Järgnevate sajandite ehitiste hulka kuuluvad veel Lohu vanema linnuse kaitsevall ja Varbola linnuse kaitsevall. [12]

Lubjakivi töötlemise oskus jõudis Eestisse alles 13. sajandil. Tänu Saksamaa ja Skandinaavia sisserändajatele õpiti lubja põletama ja kasutama kui karboniseeruvat sideainet (Joonis 1.1.2). [3] 13.-19. sajandil oli lubjakivi lisaks savile üks enamlevinud maavarasid. Suur hulk ehitusest koondus linnustesse ja linnadesse. Tuntud ehitiste hulka kuuluvad näiteks Padise klooster, Kuressaare loss ja Narva kindlus. [12]



Joonis 1.1.2. Lubja keemiline ringlus [3]

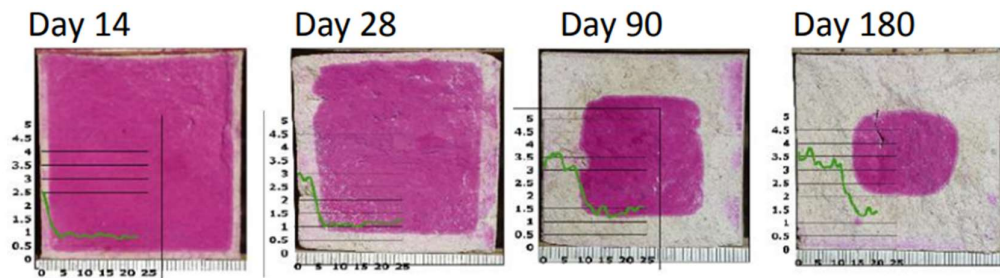
Lubja karboniseerumine

Süsihappegaasi ja niiskuse mõjul muutub lubsideaine ajapikku taas tehnilikuks lubjakiviks ehk toimub karboniseerimine: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + (n+1)\text{H}_2\text{O}$. Karboniseerumisprotsess toimub materjali pinnalt sisemuse poole ja selle kiirust mõjutab materjali poorsus. [7] Süsihappegaas liigub difusiooniga läbi pooride, kus see poorides oleva vee toimel reageerib aluseline kaltsiumhüdroksiidiga ning toimub karbonaatne kivinemine, millega mördi pH langeb [13]. Karboniseerumisega kaasneb materjali tiheduse ja tugevuse kasv [7].

Veesisaldus peaks mördis olema vahemikus 6-0,6%, vastasel korral karboniseerumine peatub. Seetõttu ei ole soovitatav krohvida päikesepaistel ja krohvi on tarvis regulaarselt niisutada. [10]

20. sajandil põletati siseruumide krohvimistöde ajal koksiahjusid, et tekitada suurem süsihappegaasi sisaldus õhus ja lubja kiirem karboniseerumine [10]. Samas on avastatud, et õhus leiduva süsihappegaasi kontsentratsioon mõjutab lisaks karboniseerumise kiirusele ka mördi kristallstruktuuri, morfoloogiat ja poorsust [14].

Karboniseerumisprotsess võib olenevalt tingimustest kesta nädalaid või aastaid. Selle kulgemist ajas on võimalik jälgida fenoolftaleiini lahusega. See on indikaator, mis aluselise materjaliga kokkupuutes (pH on $\geq 8,2$) muudab värvi. Lubipõhiste mörtide puhul viitab roosa värv kaltsiumhüdroksiidi olemasolule, mis tähendab, et mört ei ole täielikult kristalliseerunud (Joonis 1.1.3). [13]



Joonis 1.1.3 Fenoolftaleiini lahusega kontrollitud lubja karboniseerumine 180. päeva jooksul

Lisaks fenoolftaleiini lahusele on tuntud meetod materjalide koostise kontrollimiseks termogravimeetiline analüüs. Selle analüüsiga muudetakse temperatuuri vahemikus 400-520 °C, mis toob kaasa mittekarboniseerunud kaltsiumhüdroksiidi termilisest lagunemisest tingitud kaalu kaotuse. [13]

Karboniseerumisastet on võimalik jälgida ka röntgendifraktsiooniga, kuid kaltsiumhüdroksiidi olemasolu ei ole võimalik enam tuvastada, kui 90% mõrdist on karboniseerunud. Seega ei taga see igal ajahetkel usaldusväärseid tulemusi. [13]

Rohelise mõtteviisi rakendamiseks ja hoonete restaureerimiseks on looduslike ja traditsiooniliste ehitusmaterjalide kasutamine tänapäeval endiselt oluline [15]. Lubjakivist toodetud lubi on nüüdisajal ehituses kasutusel eelkõige mördi, krohvi ja värvi koostisosana, kusjuures värvi tootmiseks peab lubi olema väga kõrge kaltsiumoksiidi (CaO) sisaldusega. Lubja on saadaval nii pulbri kui ka taignana (lubjapasta/-piim), kuid seda eelkõige kustutatud kujul, et vältida hilisemad suuri mahu ja temperatuuri muutusi ning tööõnnetusi. [7]

Lubi toimib mõrdis sideainena, mis tekitab täitematerjali ümber struktuuri ja seob kivinedes materjali ühtseks. Lubi annab materjalile hea poorsuse, kuid on üsna nõrk sideaine. [10] Mört peab olema poorne, nakkuv ja plastiline, et tagada tarindi niiskuse väljapääs ja pidada sammu hoone dünaamikaga. Selle vajalikkuse tõid ilmsiks ka NSV Liidu ajal tehtud vead, kus vanade hoonete fassaadi restaureerimiseks kasutati niiskust mitteläbilaskvat tsemendipõhist mörti. Sellise teguviisi tagajärjeks oli hullemlal juhul hoopis hoone laiaulatuslikum lagunemine.[15]

1.2. Soojusisolatsioonkrohv

Kliimamuutusega kaasnevad probleemid on muutunud niivõrd tõsiseks, et Euroopa Liit kutsub aina enam keskenduma energiasäästlikkusele [16]. Tööstus ja ehitus on üks suurimaid energia tarbijaid ja heite tekitajaid. Nüüdisajal arendatakse järjepanu uusi energiaallikaid ja keskkonnasõbralikke materjale, et vähendada energia tarbimist. [17]

Üha enam arendatakse turul olevaid mörte, kus traditsioonilistes mörtides laialtlevinud täitematerjali liiva asemel lisatakse segusse väiksema soojusjuhtivusega kergeid täiteained [18] [19]. Kergete täitematerjalide hulka võivad kuuluda näiteks pimssliiv, räbuliiv, keramsiitliiv, perliit ja saepuru, mis parandavad hoone soojakadu ja akustikat. Sideainena võivad kasutust leida näiteks kips, tsement või mitme koostisaine põhine sideaine. [20] Ehitusmaterjalide tootearendus puudutab nii olemasolevaid kui ka tulevikus rajatavaid ehitisi [17].

Olemasolevate hoonete hulgast võib eriliselt suurt mõju avaldada ajalooliste hoonete renoveerimine, kuna nende maht on märkimisväärselt suur. Euroopas on ligikaudu 26% hoonetest ehitatud enne 20. sajandi keskpaika. Belgias, Taanis, Itaalias, Lätis ja Rootsis on see protsent isegi vahemikus 27-38%. Nende hoonete eripära seisneb toona kasutatud tehniliste ja arhitektuursete võtete kasutamisel, mis tänaseks omavad olulist ajaloolist väärtust. [1]

Aastatega hoonete renoveerimistöõde maht kasvab, mis tekitab suuremat nõudlust sobilike materjalide järele [21]. Traditsioonilised ehitised ehk ehitised, mis on valminud enne 20. sajandi teist poolt on sageli materjalidest, mis on poorsed ja kapillaaraktiivsed ehk suure veeimavusega. Renoveerimisel on oluline jälgida samu kasutatud dünaamilisi aspekte. [1]

Sobiliku materjali valikuga paiskame ka atmosfääri vähem saasteained, kulutame vähem kütte tarbimisele ning panustame rohkem keskkonna heaolule ja inimese tervisele [17]. Soojusisolatsioonkrohv on üks võimalik välja töötatud lahendus, mida olemasolevate hoonete renoveerimiseks kasutada [22].

Soojustusmaterjal on materjal, mis põhineb selle omadusel vähendada piirde soojusläbivust (U-arv) ehk minimeerida soojuse levimise kiirust juhtivuse, konvektsiooni ja kiirguse teel [23]. Hiljaaegu välja töötatud erineva sideainega soojusisolatsioonkrohvid on lühikese ajaga omandanud suurt huvi [17].

Termokrohv ehk soojusisolatsioonkrohv on enamasti kuivseguna toodetud krohv, mis on välja töötatud hoonete soojusisoleerimiseks [24]. Standardi EN 998-1:2017 kohaselt on soojusisolatsioonmördi definitsiooni aluseks erisoojusjuhtivus, mis peab 10 °C juures

olema väiksem kui $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Mördi koostisosana on olulisel kohal kerge täiteaine [16].

Lähtuvalt soojustakistuse suurendamiseks kasutatud täiteainest liigitatakse soojusisolatsioonmördid kaheks: organiiline mört ja anorgaaniline mört. Hiinas teostatud uuringu põhiselt on orgaanilise mördi üks enamlevinumaid soojust takistavaid koostisosasid polüstüreengraanulid. Anorgaanilistes mörtides leiavad suurimat kasutust seest õõnes helmed. [24]

Euroopas saadaolevate soojusisolatsioonkrohvide seas on laialt levinud koostisosade kombinatsioonid tsement ja/või tehissideained ning tsement ja paisutatud mineraalsed täiteained. Tuntud on ka hüdrauilisel lubjal põhinevad krohvid. Vähem on välja töötatud krohve, kus kerge täitematerjali komponentideks oleksid kõrvalsaadused ja sideaineks väiksema energiakuluga ehitusmaterjalid, kuigi need on keskkonna heaolu aspektist tõhusamad. [17]

Üha enam kaasatakse teadust, et optimeerida soojusisolatsioonkrohvide segusid vastavalt nende komponentidele [22]. Erinevates uuringutes on segudes alternatiivmaterjalidena kajastust leidnud näiteks paisutatud perliit, lendtuhk, ränidioksiid, kõrgahjuräbu, vahtpolüstüreen [19] [25], lisaks putsolaan, korgigraanulid, polüuretaanvaht, keramsiit, puidujäätmed ja pimsskivi [19]. Korki ja kanepit on kaasatud teadusuuringutesse, mis keskenduvad muinsuskaitse all olevatele hoonetele, vahtpolüstüreeni muude müüritiste ja kiviseinte katmiseks [16].

Jäätmete taaskasutamiseks on koostisosade hulka lisatud isegi oliivikive ja plastikjätmeid [16]. Dokumenteeritud on veel klaasi, paberimuda, kummi, mikroniseeritud rehvikide ja elektrikaablite jätmeid või põllumajandusjätmeid nagu riisikestade, nisukõrre ja suhkruroo varre tuhk [25].

Metakaoliin ja lendtuhk on lubitsementkrohvi kõrval head alternatiivsideained. Nende sisaldus krohvis parandab selle mehaanilisi ja soojusisolatsiooni omadusi. Need ehitusmaterjalid on poorsed, samas vähem tundlikud niiskusele. [17]

Lisaks keskkonna saastamise vähendamisele võib energiatõhus lähenemine parandada ruumide kasutusmugavust. Soojusisolatsioonmörtidel on mitmeid kasutuseeliseid. [16] Kergete täitematerjalide kasutamine mördis vähendab selle kaalu, parandab soojusisolatsiooni omadusi, tulekindlust ning töödeldavust [26]. Orgaanilise täiteainega mördi soojustakistus on reeglina parem, selle tulekindlus aga halvem kui anorgaanilisel mördil. Lisaks on anorgaanilises mördis kasutatud õõneshelmestel kõrge tugevus, kerge kaal, väike veeimavus, pikk kasutusiga, korrosioonikindlus ja kiirguskaitse. [24]

Soojusisolatsioonkrohve on võimalik kasutada hoone sise- ja/või välispinnal [17]. Arvestades soojusisolatsioonkrohvi soojuseri juhtivuseks $0,07 \text{ W/(mK)}$ ja maakiviseina (60 cm) soojusjuhtivuseks $U = 2,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, aitab 5-sentimeetri paksune soojusisolatsioonkrohvi kiht ($R=0,05/0,07=0,71 \text{ m}^2\text{K/W}$) vähendada seina soojuslähivust ca $1,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ võrra [27]. Soojusisolatsioonkrohv ei vaja eraldiseisvaid kinnitusi ja seda on lihtne eemaldada. See täidab hästi ebatasased pinnad ja praod [16]. Ühtlasi on oluline täheldada, et looduslike ehitusmaterjalide kasutamisega kaasneb vähem terviseriske. Sünteetilised, keemilised ja õhutihedad materjalid võivad tekitada soodsaid tingimusi hallituse ja mädaniku tekkeks või tekitada tervise kahjustusi aurustumise teel. [15]

Kerge täiteainega mörtide kasutusvõimalusi on uuritud ka põranda isolatsioonina, eesmärgiga vähendada sammumüra. Võrreldes erineva kerge täiteainega (vahtpolüstüreen, kork, paisutatud savi) tsemendimörte, on paisutatud savil põhinev soojusisolatsioonmört oluliselt vähem efektiivne, kuna sellel on suurem jäikus. [28]

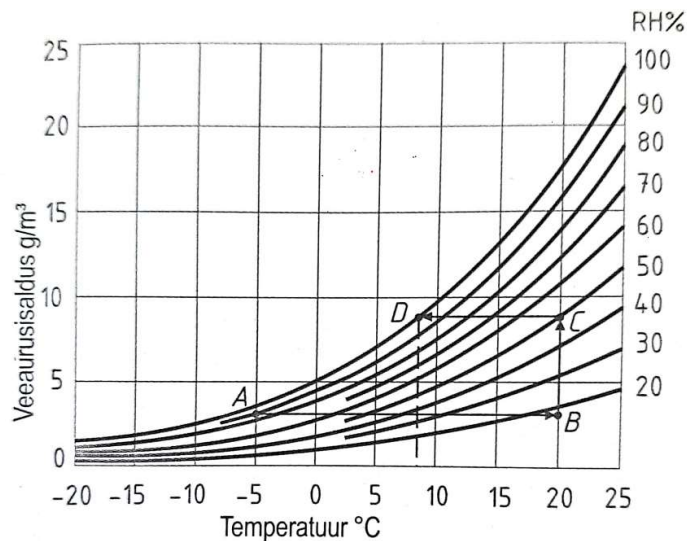
1.3. Hoone niiskustehniline toimivus

1.3.1. Niiskus õhus

Niiskus on gaasi, vedeliku või tahkisenä esinev keemiliselt sidumata vesi [29]. Seda kohtab nii pinnases, materjalides kui ka õhus [30].

Veeaur on gaasina esinev niiskus [31]. Veeauru sisaldust õhus saab määratleda kolmel erineval moel: veeauru hulk osarõhuna (Pa) õhus, veeauru hulk mahuühikuna (g/m^3) õhus – absoluutne niiskus, veeauru hulk protsentuaalselt (%) õhus – suhteline niiskus [30]. Suhteline niiskus on veeauru osarõhu ja küllastunud rõhu suhe. Absoluutne niiskus on veeauru ja kuiva õhu massi suhe. [31]

Igale temperatuurile vastab kindel küllastusniiskus. Küllastusniiskus on kindlal temperatuuril maksimaalne võimalik absoluutne õhuniiskus [30] [32]. Mida kõrgem on temperatuur, seda suurem saab olla veeauru sisaldus õhus. Temperatuuri langus kindlal õhuniiskusel toob kaasa küllastusniiskus languse ja tekib kondensaat ehk kastepunkt (Joonis 1.3.1). [32]

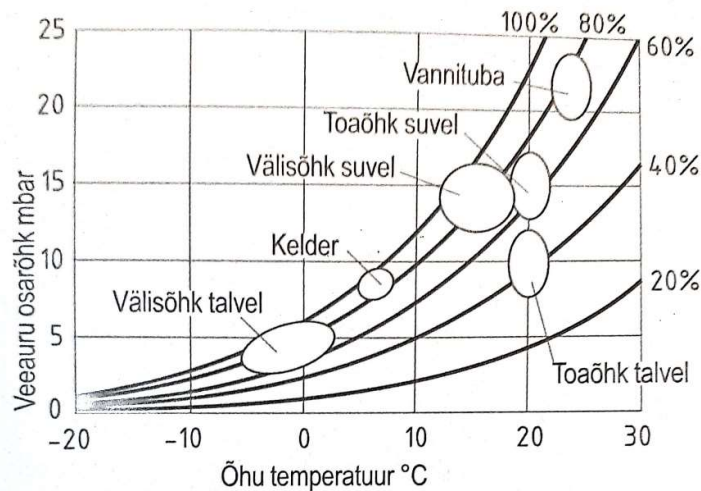


Joonis 1.2.1 Veeauru hulk õhus sõltuvalt temperatuurist [32]

1.3.2. Niiskuslevi ja ehitusmaterjalide omadused

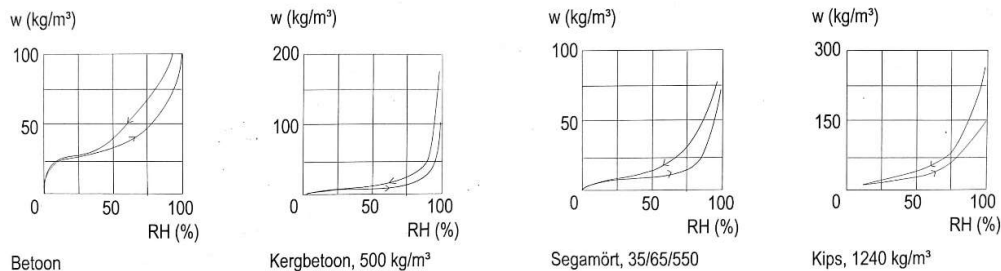
Eri keskkondades on veeauru hulk ja osarõhk õhus erinevad (Joonis 1.3.2). Mida suurem on veeauru sisaldus õhus, seda suurem on veeauru osarõhk. [30] Keskkondade veeauru hulga erinevust tekitab niiskuslisa. Talvel on peamiselt välisõhu rõhk väiksem ja siseõhu rõhk suurem ning suvel vastupidi. [29] Veeaur liigub kõrgema rõhuga alalt madalama

rõhuga alale [30]. See tähendab, et erineva rõhuga välis- ja siseõhk üritavad omavahel seguneda [29].



Joonis 1.3.2 Veeauru osarõhk õhus erinevates keskkondades [32]

Niiskuslevi materjalides toimib peamiselt kapillaarjõudude ja difusiooni teel [33]. Ehitusmaterjalide niiskuse hulk sõltub ümbritseva õhu suhtelisest niiskusest ja materjali omadustest [32]. Kui materjal on püsivas keskkonnas, jääb selle niiskuskonstantseks ehk saavutab tasakaaluniiskuse. Materjali omadust siduda õhust veeauru nimetatakse hügroskoopsuseks. [20] Materjali niiskumisprotsessi veeauru toimel nimetatakse sorptsiooniks [32]. See on kahe-suunaline protsess – niiskumine ja kuivamine. Kusjuures materjali niiskus ühel ja samal õhuniiskusel on kummalgi erinev. Kuivades kaotab materjal samal õhuniiskusel alati vähem kaalu. Erinevate materjalide käitumine eelnimetatud protsessis on väga erinev (Joonis 1.3.4). [30]



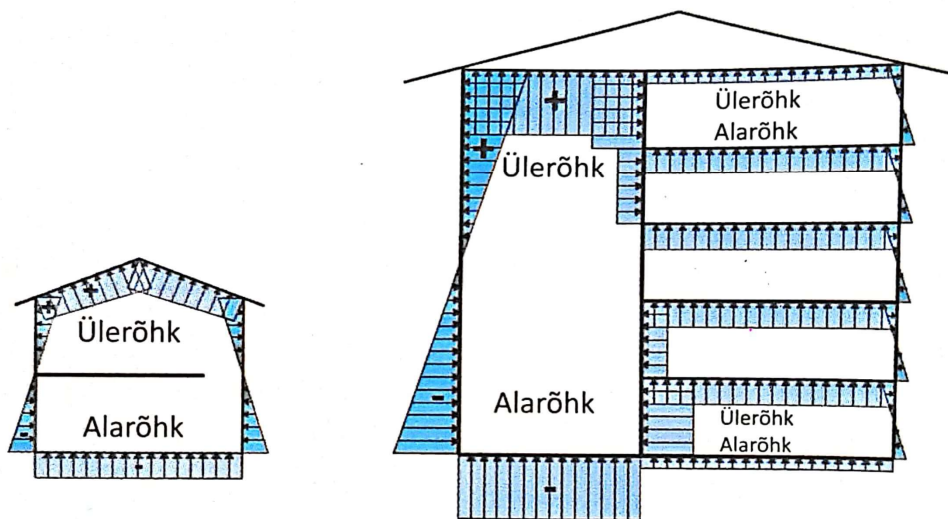
Joonis 1.3.4 Erinevate materjalide sorptsioonkõverad lähtuvalt suhtelisest õhuniiskusest [30]

Poorsed ja hüdrofiilsed ehitusmaterjalid on rohkem vastuvõtlikud ümbritsevatele niiskusele [32]. Poorsus on füüsikaline omadus, mis näitab materjali tühimike ja tahkete osade suhet protsentuaalselt [20]. Materjali poorsus võib esineda nii avatud kui ka

suletud kujul. Avatud poorid on ümbritsevale keskkonnale avatud, st on võimelised mahutama vett või veeauru. Seevastu suletud poorid on ümbritsevale keskkonnale suletud ning vee või veeauru otsene ligipääs poori sisse puudub. Lisaks liigitatakse poore nende suuruse alusel. Poorsus mõjutab otseselt materjalide käitumist, sh tugevust, vastupidavust, külmakindlust ja soojapidavust. [7]

Krohvimördi üks ülesanne on kaitsta tarindit välismõjude eest [20]. Niiskus võib sattuda tarindisse õhuvooluga sademete ja lume näol, kuid võib sattuda sinna veel lisaniiskuse tekitamise ja vee kondenseerumisega, pinnasest või ümbritsevatest materjalidest leviva vee, lume sulavee ja ehitusniiskuse mõjul. [29]

Õhurõhust tingitud veeauru liikumist õhus nimetatakse konvektsiooniks [31]. Konvektsioon võib tekkida nii temperatuurierinevusest, tuulest kui ka ventilatsioonist. Tarindis olev õhurõhkude vahe toob kaasa õhu liikumise läbi tarindi, mille tulemusena võib sinna sattuda suurel hulgal tihendatud veeauru või vett (Joonis 1.3.3). [29]



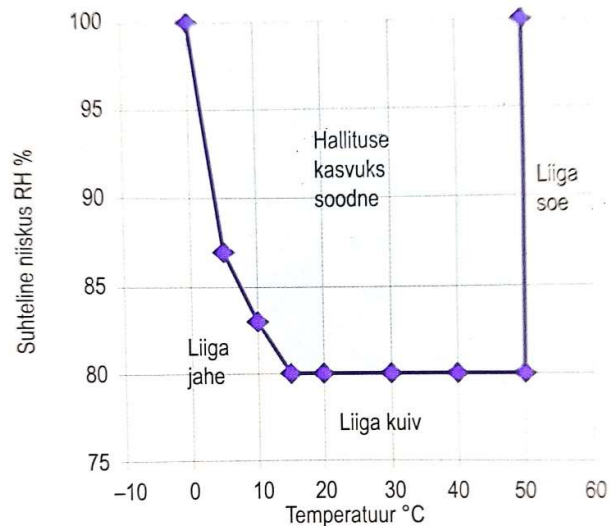
Joonis 1.3.3 Sise- ja välisõhutemperatuuri erinevusest tingitud õhurõhu jagunemine tarindites talvel [29]

Olukorras, kus suurte pooride osakaal krohvis on suurem kui tarindis, satub vesi kergesti tarindisse. Kuivamine on aga läbi krohvikihi aeglasem, mille tulemusena võib konstruktsioon jääda märjaks. Kui krohvis on väiksemad poorid, märgub tarind aeglasemalt, sealhulgas kuivades imeb krohv vee kapillaarjõudude toimele välja kergema vaevaga. Sel juhul kaitseb krohv tarindit niiskumise eest või käitub ohverduskihina. Samas tuleb arvestada, et ka maapinnast tulenev niiskus peab pinna kaudu kuivama, mistõttu peab krohv laskma tarindis oleval veel ühtlaselt aurustuda. [10]

1.3.3. Niiskuskahjustused ja -deformatsioonid

Keskkonnamõjudest on niiskus üks ohtlikemaid tegureid hoone konstruktsioonile, hõlmates ligi 80% kahjustustest [2]. Niiskus ise ei pruugi ehitusmaterjalidele kahjulik olla [30]. Küll aga tarindisse sattuv niiskus ei tohi ületada piiri, mis kahjustaks hoone konstruktsioone ja toimivust [29]. EVS-EN ISO 13788:2012 [34] kohaselt nimetatakse seda kriitiliseks niiskuseks, mille väärtus sõltub konkreetsest materjalist või mille piirväärtuseks tootja andmete puudumisel võib lugeda suhtelist õhuniiskust 75% ja sellele õhuniiskusele vastavat materjali niiskust. Kriitilise niiskuse ületamine võib kaasa tuua kahjulikke füüsikalisi, keemilisi, bioloogilisi ja esteetilisi tagajärgi. Nende hulka võivad kuuluda näiteks materjalide deformeerumine, füüsikaliste omaduste halvenemine (tugevus, soojapidavus langeb), mädaniku ja hallituse teke, määrdumine ja ainete välja uhtumine või emissioon. [29]

Hallituse tekke aluseks on kindel suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri vahekord (Joonis 1.3.5). Hallitus ei teki ruumis endas, vaid tarindis või selle pinnal. Sealhulgas tuleb arvestada, et hallituse teke sõltub ka konkreetsest materjalist. Näiteks toatemperatuuril hallituse tekkeks on puidul tarvis 75-80% õhuniiskust; betoonil, mineraalvillal ja vahtpolüstüreenil aga 90-95% õhuniiskust. [30]



Joonis 1.3.5 Hallituse tekke tingimused [30]

1.4. Soojusisolatsioonkrohvides kasutavad koostisosad

Vulkaaniline silikaatliiv - Termosiliit on obsidiaani töötlemisel saadud aine, mis paisub töötlemise käigus ca 15 korda. Selle tulemuseks on suletud pooridega kerge materjal, mille puistetihedus on 80-200 g/m³ ja soojuseri juhtivus 0,046-0,06 W/(m.K). [17]

Metakaoliin on putsolaan, mis on kaoliinsavi kaltsineerimisest saadud aine. Metakaoliin on väärtuslik betooni lisand, mille kiire reaktsioonivõime vähendab kaltsiumhüdroksiidi sisaldust betoonis. Metakaoliini lisamisel betoonile on täheldatud selle omaduste paranemist: suurem vastupidavus kloriididele, külmumis-sulamiskindlus, vähenenud kokku tõmbumine, parem sulfaadikindlus ja vastupidavus hapetele, parem tugevus ja kulumiskindlus. [35]

Õhku manustavad orgaanilised lisandid on lisandid, mida kasutatakse betoonisegus, et tagada mördi stabiilsem õhumullide vahekord. Selle tulemusena paraneb mördi külmakindlus ja töödeldavus, sh väheneb vee-eraldus, mistõttu on väiksem vajadus veele. Lisaks suureneb betooni koospüsivus ja sulfaadikindlus. [36]

Metüültselluloos on polümeer, mis toimib paksendaja, emulgaatori ja katteainena. Metüültselluloos ei ole toksiline ja sellel on kõrge adhesioon. [37] See on levinud koostisosa mördis ja betoonis, kuna tõstab siduvust ja veehoidvust. Metüültselluloos annab mördile poorsed omadused, kuid vähendab selle tugevust. [38]

Hüdraatlubi ehk kaltsiumhüdroksiid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) on kaltsiumoksiidi kustutamisel saadud aine, millele on lisatud kindel kogus vett. Kuivsideaine tootmiseks lisatakse lubjale reeglina 1/3 vett. [10]

Lubjapasta on hüdraatlubi, mille saamiseks on kaltsiumoksiidi kustutamise käigus lisatud kaks korda rohkem vett kui lubja [10].

Valge tsement on portlandtsement, mis erineb hallist tsemendist peamiselt värviomaduste tõttu. Valge tsemendi värvus tuleneb nii lähtematerjalidest kui ka tootmisprotsessist. [39] Portlandtsement on hüdrauliline sideaine, mille saamiseks on reeglina tarvis 60% rohkem lähteaineid. Sideaine veega segunemisel kivineb. [7] Tsementmört on suure tugevusega ja peab hästi vastu niiskusele, kuid on kehva plastisuse ja veehoidvusega [20].

Silaan on vesinikuga räniühend ($\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$), millest kõige tuntum on oktasilaan. Silaan on hea redutseerija, mis hüdrolyüsib eriti hästi aluselises keskkonnas. Silaan on sobilik aine materjalide sidumiseks ja tugevdamiseks. [40]

2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Käesoleva töö eesmärk on uurida sarnase koostisega lubjapõhiste soojusisolatsioonkrohvide niiskustehnilisi omadusi, sealhulgas analüüsida erinevate lisaainete mõju ja õhku manustatava süsihappegaasi (CO₂) mõju niiskustehnilistele omadustele ning karboniseerumisele. Uurimistöö jaguneb kaheks osaks: teoreetiline ja praktiline.

Praktiline osa koosneb katsekehade valmistamisest ja niiskustehniliste katsete läbi viimisest, mille põhieesmärgiks on uurida krohvide kapillaarset veeimavust, hügrokoopseid sorptsiooni ja veeauru läbilaskeomadusi. Uurimistöö praktiline osa on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis ja töö aluseks on võetud Eestis kehtivad standardid, mida on järgitud käesoleva uurimistöö võimaluste piires.

Uurimistöö eesmärgi alusel seatud etapid:

- Katsekehade kivinemine ja karboniseerumine
- Katsete teostus
 - Kapillaarse veeimavuskoefitsiendi määramine
 - Hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramine
 - Veeauru läbilaskeomaduste määramine
- Katsetulemuste fikseerimine, arutelu, järeldused ja kokkuvõte

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1. Katsekehades kasutatud materjal

Uurimistöö teostati ehitusmaterjalide tootearenduse tarvis. Katsete läbiviimiseks hangiti tootjalt vajalikud krohvisegud. Kokku oli viis erinevat kuivsegu mahuga 4-5 liitrit, millest igaüks oli pakendatud erinevasse kilest kotti. Kõik katsetes kasutatud krohvid on sarnased ja põhinevad lubisideainel ning mineraalsel kergel täiteainel. Krohvide erinevus seisneb üksikute koostisosade vahetamisel või lisamisel ja nende kogustel.

Katsetes kasutatud krohvid vastavalt komponentidele:

TK – termiliselt töödeldud vulkaaniline silikaatliiv, **hüdraatlubi**, metakaoliin, õhku manustavad orgaanilised lisandid ja metüülselluloos.

TP – termiliselt töödeldud vulkaaniline silikaatliiv, **lubjapasta**, metakaoliin, õhku manustavad orgaanilised lisandid ja metüülselluloos.

K1 – termiliselt töödeldud vulkaaniline silikaatliiv, hüdraatlubi, metakaoliin, õhku manustavad orgaanilised lisandid, metüülselluloos ja **valge tsement**.

K2 – termiliselt töödeldud vulkaaniline silikaatliiv, hüdraatlubi, metakaoliin, õhku manustavad orgaanilised lisandid, metüülselluloos ja **silaan (väiksem kogus)**.

K3 – termiliselt töödeldud vulkaaniline silikaatliiv, hüdraatlubi, metakaoliin, õhku manustavad orgaanilised lisandid, metüülselluloos ja **silaan (suurem kogus)**.

Kokkuleppel tootjaga jääb kasutatud krohvide täpsem koostisosade vahekord ja abi-/lisaainete sisaldus käesolevas uurimistöös avaldamata.

3.2. Katsekehade valmistamise meetodika

3.2.1. Mõrtide valmistamine

Katsekehade valmistamist alustati 14. veebruaril 2022. aastal Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Mõrdi valmistamise aluseks olid tootja juhend (L3.2.1) ja standard EVS 1015-3:2004+A2:2007 [41]. Kokku oli viis erinevat soojusisolatsioonkrohvi kuivsegu: TK, TP, K1, K2, K3 (Ptk 3.1).

Mõrdi valmistamisel võeti iga krohvi kuivsegu koguseks 3,6 L. Sellega oli tagatud nii standardi kohane minimaalne maht 1,5 L kui ka katsekehadele kuluv maht. Kuivsegudele TK, K1, K2 ja K3 lisati vaid vett, kuivsegule TP lisati lubjapastat (Saaremaa Lubjapasta) ja vett (Tabel 3.2.1). Koostisainete mõõtmisel kasutati mõõtesilindrit. Mõrdi segamiseks kasutati akutrelli, visplit ja plastämbrit. Konsistentsi esialgsel määramisel järgiti osauhingu tootja juhendit (Joonis L3.2.1). Valguvuse määramiseks kasutati eelnimetatud standardile vastavat raputuslauda CooperTCM-0060/E.

Esimese segu (K1) valmistamisel ei jäänud esialgne konsistents valguvuse piirmäära ulatusse (Joonis 3.2.1) Vajaliku konsistentsi saavutamiseks lisati täiendavalt vett, mis erines veidi manuaalis toodust (Joonis 3.2.2). Sarnane nähtus sai osaks kõikidele segudele, mistõttu otsustati aluseks võtta peaaesjalikult standard ning konsistents määrata lubatud valguvuse piirmäära alusel. Kergmõrdi (tihendus < 600 kg/m³) valguvuse lubatud piirmäär on 140 +/- 10 mm [41]. Kõik kasutatud konsistentsiga mõrdid jäid lubatud valguvuse piiridesse (Tabel 3.2.2).

Tabel 3.2.1 Mõrdisegude konsistentsid

Segu liik	Kuivsegu kogus (L)	Vee kogus (L)	Lubjapasta kogus (kg)
K1	3,6	1,45	
K2	3,6	1,4	
K3	3,6	1,4	
TK	3,6	1,3	
TP	3,6	0,7	1,2 kg

Tabel 3.2.2 Mõrtide mõõdetud ja lubatud valguvus

Segu liik	Mõõdetud valguvus (mm)	Lubatud valguvus (mm)
K1	138	140 +/- 10
K2	143	
K3	148	
TK	136	
TP	142	



Joonis 3.2.1 Mõrdi konsistents ja valgustus alla lubatud piirmäära



Joonis 3.2.2 Mõrdi konsistents ja valgustus lubatud piirmäära ulatuses

3.2.2. Katsekehade hoidmine ja karboniseerumisprotsess

Kindla kujuga katsekehade saamiseks asetati mördisegu vormidesse. Vastavalt edasistele katsetele jagunesid vormid kaheks – silindrid 100x25 mm (diameeter, kõrgus) ja prismad 40x40x160 mm (laius, kõrgus, pikkus). Katsekehad paigutati kivinemiseks kahte erinevasse ruumi (Joonis 3.2.3) (Tabel 3.2.3). Ühte ruumi (Minimaja 1) manustati terve hoidmise perioodi vältel täiendavalt süsihappegaasi (CO₂), et jälgida selle mõjust tulenevaid erinevusi katsekehade karboniseerumisprotsessile (Tabel L3.2.1).



Joonis 3.2.3 Katsekehade kivinemisperioodiks kasutatud ruumid

Tabel 3.2.3 Katsekehade arv ja jaotus ruumides

Segu liik	Katsekehade arv		Minimaja 2		Minimaja 1 (CO ₂)	
	Silinder	Prisma	Silinder	Prisma	Silinder	Prisma
K1	8	6	4	3	4	3
K2	8	5	4	2	4	3
K3	8	4	4	1	4	3
TK	8	6	4	3	4	3
TP	8	6	4	3	4	3
Kokku	40	27	20	12	20	15

Katsekehi hoiti võimalikult täpselt vastavalt standardis EVS-EN 1015-18:2005 [42] ette antud tingimustele:

- Hoidmise aeg – 28 päeva
- Hoidmise temperatuur – 20 +/- 2 C°

- Suhteline niiskus esimesed 7 päeva – 95% +/- 5%
- Suhteline niiskus järgmised 21 päeva – 60% +/- 5%

Katsekehad kaeti esialgu 2-kordse kilega, mille alla pandi veega mahutid, et tagada niiskus 95% +/- 5%. Karboniseerumiseks vajaliku CO₂ vajadust demonstreerisid hästi pisteliselt tehtud mõõtmised, kus CO₂ tase oli langenud kordades alla välisõhu taseme (400 ppm) (Joonis 3.2.4). Paralleelselt toimus teise grupi puhul regulaarne CO₂-ga rikastamine.



Joonis 3.2.4 Süsihappegaasi kontsentratsiooni mõõtmine õhus: a) minimaalne väärtus ilma värskes õhu ja/või CO₂ juurdepääsuta; b) CO₂ rikastatult

Seitsme päeva möödudes eemaldati kiled ning majadesse paigutati niisutid, et hoida alles jäänud perioodil niiskust 60% +/- 5%. Ruumide õhukvaliteet (temperatuur, niiskus, süsihappegaasi hulk) fikseeriti Green Eye andmelogeriga (Joonis 3.2.5).

Karboniseerumisprotsessi võrdlemiseks kaaluti katsekehasid regulaarselt. Lisaks kontrolliti katsekehade karboniseerumist üheprotsendilise fenoolftaleiini lahusega.



Joonis 3.2.5 Katsekehad kivinemisperioodil süsihappegaasiga rikastavas ruumis

3.3. Katsete läbiviimise meetoodika

3.3.1. Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine

Veeimavuse koefitsiendi määramise katsed alustati 12. aprillil 2022. aastal Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Katse teostamise aluseks oli standard EVS-EN 1015-18:2005 [42].

Katse põhimõte

Katsekehade veeimavuse koefitsiendi määramiseks kasutakse prismakujulisi katsekehasid läbimõõduga 40 x 40 x 160 mm, mis pärast pooleks murdmist asetatakse 5-10 mm sügavusele vette kindlaks määratud ajaks (Joonised L3.3.1 ja L3.3.2).

Katses kasutati järgmisi seadmeid ja vahendeid:

- 1) hüdroisolatsioonmastiks Fibergum – sulamistemperatuur $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) pintsel – katsekehade katmiseks hüdroisolatsiooniga;
- 3) kuivatuskapp Memmert UN 30;
- 4) kipsinuga – katsekehade pinna lõikamiseks;
- 5) suletav kandik – sügavus $> 20\text{ mm}$;
- 6) plastikrest – asetamiseks kandiku põhja, et tagada vee juurdepääs katsekehadele minimaalse kontaktpinnaga;
- 7) kaal – täpsusega 0,001 g;
- 8) stopper – täpsusega 1 sekund

Katse käik

Veeimavuse koefitsiendi määramise katse alustamiseks võõbati eelnevalt kuivatatud katsekehade neli külge (pikkusega 160 mm) hüdroisolatsioonmastiksiga. Kuna katsekehade pinnad olid kohati ebatasased, kaeti need kahekordse kihiga. Katsekehad kaaluti ja paigutati kuivatuskappi õhutemperatuuriga $60 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Katsekehi hoiti kuivatuskapis kaks ööpäeva saavutamaks massi stabiliseerumise. Stabiliseerunud massiga katsekehad murti kaheks võimalikult võrdseks osaks. Murdmisele eelnevalt lõigati noaga katsekehade pinnale sälgud, et vältida mastiksi ebaühtlast rebenemist ja katsekehade soovimatut murenemist.

Katsekeha mõlemad pooled kaaluti ning paigutati vette (murtud pind all pool) sügavusega 5-10 mm. Katsekehasid ei paigutatud korraga vette, vaid iga järgneva katsekeha puhul korrati sama taktikat ca 45-sekundilise vahega, et tagada igale katsekeha toimingule kuluv aeg ning saada võimalikult ligilähedased tingimused.

Katsekehi hoiti vees kokku 24 tundi ning kaalumised teostati 10-minuti, 90-minuti, 6-tunni ja 24-tunni möödumisel.

3.3.2. Hügrokoopsete sorptsioonimaduste määramine

Hügrokoopsete sorptsioonimaduste määramise katsed alustati 9. aprillil 2022. aastal Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Katse teostamise aluseks oli standard EVS-EN ISO 12571:2021 [43].

Katse põhimõte

Hügrokoopsete sorptsioonimaduste määramiseks kasutatakse silindrikujulisi katsekehasid, mis asetatakse kliimakambrisse õhutemperatuuril $23 \pm 0,5$ °C ja suhtelisel õhuniiskusel vahemikus 0% - 95% (Joonis L3.3.3)

Katses kasutati järgmisi seadmeid ja vahendeid:

- 1) kliimakamber RUMED 4101;
- 2) kaal - täpsusega 0,001 g

Katse käik

Hügrokoopsete sorptsioonimaduste määramise katseks paigutati eelnevalt kuivatatud katsekehad (RH=0%) kliimakambrisse RUMED 4101 temperatuuril $23 \pm 0,5$ °C. Katse teostamiseks valiti vahemikus 30% - 95% RH neli erinevat suhtelise õhuniiskuse parameetrit: 30%, 50%, 75%, 95% RH.

Sorptsiooni katsed alustati suhtelisel õhuniiskusel 30% RH. Katsekehade kaalumised teostati 24-tunnise intervalliga kuni massi stabiliseerumiseni. Seejärel tõsteti suhtelise õhuniiskuse taset järgmise valitud parameetrini. Protseduuri korrati kõikide valitud õhuniiskustasemetega (30% - 50% - 75% - 95%).

Desorptsiooni katsed alustati suhtelisel õhuniiskusel 95% RH. Katsekehade kaalumised teostati 24-tunnise intervalliga kuni massikaalu stabiliseerumiseni. Seejärel langetati suhtelise õhuniiskuse taset järgmise valitud parameetrini. Protseduuri korrati kõikide valitud õhuniiskustasemetega (95% - 75% - 50% - 30%).

3.3.3. Veeauru läbilaskvuse määramine

Veeauru läbilaskvuse määramise katsed alustati 5. mail 2022. aastal Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledžis. Katse teostamise aluseks oli standard EVS-EN ISO 12572:2016 [44].

Katse põhimõte

Veeauru läbilaskeomaduste määramiseks kasutatakse silindrikujulisi katsekehasid. Kummalegi poole katsekeha pinda tekitatakse erinev aururõhk (kuivaine või märgainega), millega tagatakse veeauru liikumine läbi katsekeha (Joonis L3.3.4).

Katses kasutati järgmisi seadmeid ja vahendeid:

- 1) kliimakamber RUMED 4101;
- 2) kaal – täpsusega 0,001 g;
- 3) toidukile – katsekeha ja anuma servade tihendamiseks;
- 4) küllastunud KNO_3 soolalahus – suhtelise õhuniiskuse tekitamiseks;
- 5) alt suletud silindrilised vormid – soolalahuse ja katsekeha paigutamiseks

Katse käik

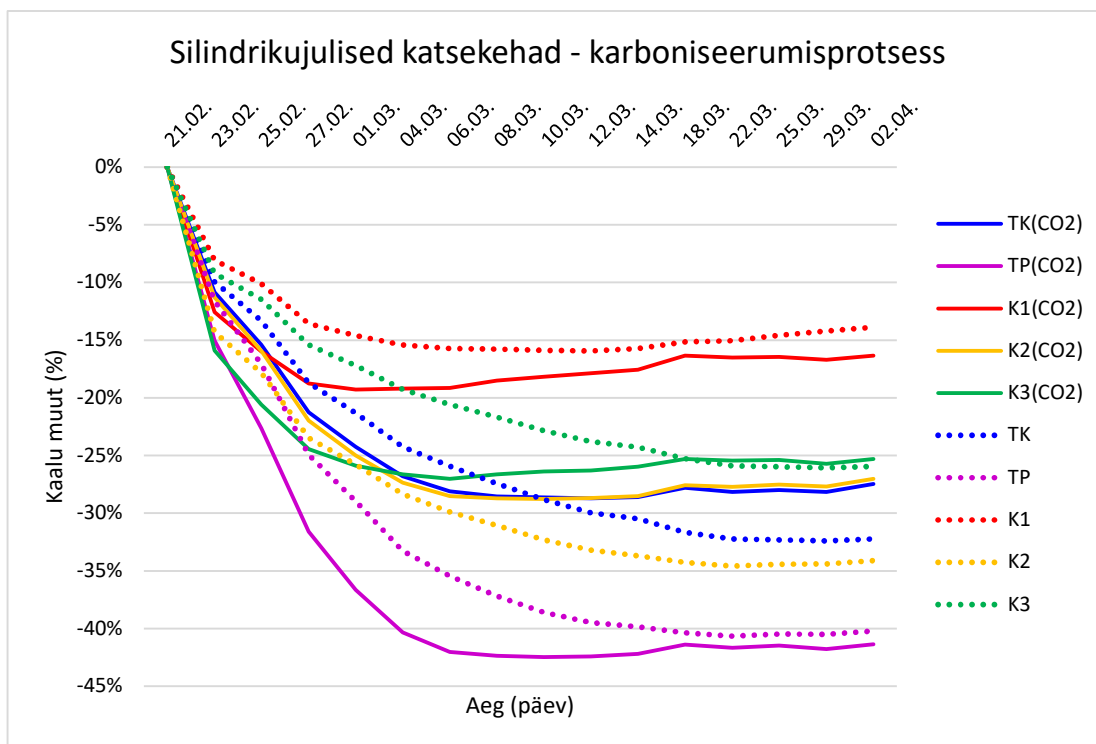
Käesolevas uurimistöös kasutati erineva aururõhu tekitamiseks standardis pakutud valikut C 50/93. Veeauru läbilaskeomaduste määramise katse alustamiseks tihendati katsekehade küljed toidukilega, et muuta katsekeha servad õhutihedaks ja tagada õhu liikumine vaid läbi katsekeha pinna. Seejärel valmistati küllastunud kaaliumnitraadi (KNO_3) soolalahus ja valati vormidesse, et tagada vormis ligikaudu 93% suhteline niiskus. Katsekehad asetati soolalahusega täidetud vormidesse, kus katsekeha ja soolalahuse vahele jäeti 15 ± 5 mm vaba ruumi. Katsekehade ja vormi serva õhuvahed tihendati. Komplekteeritud katsekehad asetati kliimakambrisse õhutemperatuuril $23 \pm 0,5$ °C ja suhtelisel õhuniiskusel 50%. Rõhuerinevusest tingitud soolalahuse kadu läbi katsekeha fikseeriti kaalumise teel üks kord päevas kuni kaalu muudu stabiliseerumiseni.

4. TULEMUSED

4.1. Karboniseerumisprotsess ja kuivtihedus

Kivinemise ja karboniseerumisprotsessi vältel kaaluti kõiki katsekehasid (Tabel L4.1.1 ja L4.1.2.). Kaalumise tulemusena selgus, et kõik hoidmise ajal CO₂-ga **rikastatud** katsekehad stabiliseerusid kiiremini, see tähendab langetasid kivinemisel kaalu kiiremini ja hakkasid kaalus juurde võtma varem kui CO₂-ga **rikastamata** katsekehad (Joonised 4.1.1 ja 4.1.2).

CO₂-ga **rikastatud** katsekehad hakkasid keskmiselt kaalu koguma juba 22 päeva hiljem (08.03.22), CO₂-ga **rikastamata** katsekehad aga alles 30 päeva hiljem (25.03.22.) Hiljem kaotasid CO₂-ga **rikastatud** katsekehad mõnel päeval uuesti kaalu, kuid see tulenes asjaolust, et sealse maja niisuti lakkas töötamast, mistõttu langes ruumi suhteline õhuniiskus alla 50%. See ei taganud ruumides enam võrreldavaid tingimusi.

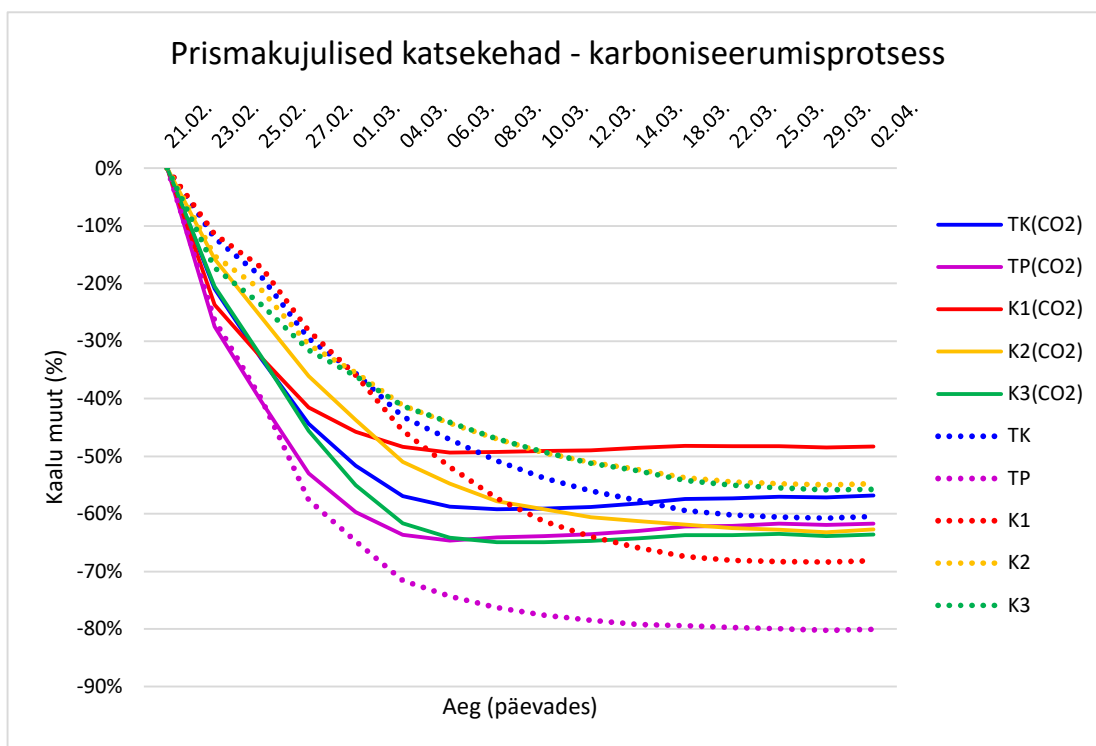


Joonis 4.1.1 Silindrikujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi kaalu muutus ajas

Silindrikujuliste katsekehade puhul tuleb esile selge tulemus ka katsekehade omavahelises võrdluses. Nii CO₂-ga **rikastatud** kui ka **rikastamata** katsekehade puhul on näha järjestus, mil määral katsekehad kaalu langetasid. Märgatavalt vähem kaotasid kaalu krohvi K1 katsekehad (13,9-16,4 %; 10,4-11,4 g). Sellele järgnesid väiksemate

vahedega krohvid K3 (25,3-26,0 %; 18,2-21,2 g), TK (27,5-32,2 %; 20,7-24,7 g) ja K2 (27,0-34,1 %; 20,6-26,4 g). Märgatavalt rohkem kaotasid kaalu krohvi TP katsekehad (40,2-41,4 %; 28,4-29,5) (Tabelid L4.1.1 ja L4.1.2).

Prismakujuliste katsekehade puhul nii selget joont ei eristu. Krohvi TP katsekehad paistavad endiselt silma suure kaalu languse poolest, kuigi on ruumide põhjal võrdlemisi erinevad. Krohvid K3, TK, K2 on rohkem lähestikku. Krohvi K1 katsekehad on kummaski ruumis kaotanud üsna erineval hulgal kaalu. Andmete suurem erinevus võib tuleneda asjaolust, et prismakujulisi katsekehasid K2 ja K3 oli CO₂-ga **rikastamata** ruumis vähem, mis ei pruugi anda sama usaldusväärset tulemust.



Joonis 4.1.2 Prismakujuliste katsekehade karboniseerumisprotsessi kaalu muutus ajas

Lisaks kaalumisele kontrolliti katsekehade karboniseerumist 1%-lise fenoolftaleiini lahusega. Esimene kontroll viidi läbi kuu aja möödudes 14.03.2022. Igast krohvist võeti kaks katsekeha (üks silinder, üks prisma), mille kahele pinnale tilgutati pipetiga peale fenoolftaleiini lahust.

Kõik katsekehad värvusid. Pinnad, mis olid ruumile rohkem avatud ehk peal pool, värvusid õrnalt roosaks või helelillaks (Joonis 4.1.3). Pinnad, mis olid vastu alust ehk all pool, värvusid tumelillaks (Joonis 4.1.4). Kuna katsekehad ei olnud suures ulatuses karboniseerunud, otsustati hoidmise aega pikendada. Lisaks vahetati katsekehade pooli, et tagada õhu parem ligipääs ka katsekeha alumisele pinnale.



Joonis 4.1.3 Fenoolftaleiiniga kontrollitud ca ühe kuu vanuste (14.03.22) katsekehade pealmine pind (vasakul CO_2 -ga rikastamata, paremal CO_2 -ga rikastatud katsekehad)



Joonis 4.1.4 Fenoolftaleiiniga kontrollitud ca ühe kuu vanuste (14.03.22) katsekehade alumine pind (vasakul CO_2 -ga rikastamata, paremal CO_2 -ga rikastatud katsekehad)

Teine kontroll fenoolftaleiini lahusega teostati järgmise kuu aja möödudes (kahe kuu vanuselt) vahetult enne katsete algust. Seekord kõik katsekehad värvi ei muutnud. Katsekehade pealmine pind jäi värvusetuks või tuli esile vaevu märgatav heleroosa toon

(Joonis 4.1.5). Katsekehade alumine pind värvus ka seekord lillaks, kuigi esialgse tulemusega võrreldes märksa heledamates toonides (Joonis 4.1.6).



Joonis 4.1.5 Fenoolftaleiiniga kontrollitud ca kahe kuu vanuste (06.04.22) katsekehade pealmine pind (vasakul CO_2 -ga rikastamata, paremal CO_2 -ga rikastatud katsekehad)



Joonis 4.1.6 Fenoolftaleiiniga kontrollitud ca kahe kuu vanuste (06.04.22) katsekehade alumine pind (vasakul CO_2 -ga rikastamata, paremal CO_2 -ga rikastatud katsekehad)

Fenoolftaleiini lahusega kontrollimise tulemusena on näha, et CO₂-ga **rikastatud** katsekehad (paremal) on mõlemal juhul enamjaolt veidi väiksema värvikontrastiga. Kuigi väikest erinevust on näha, ei ole see silmaga hoomatavalt väga eristav ja selge, sealhulgas on kontrollitud vaid katsekehade pindasid. Katsekehade pealmisi pindasid ei karestatud. Silindrikujuliste katsekehade alumine pind oli vastu puuvillast riidet, mille eemaldamisel võis aset leida osaline karestamine. Katsekehade lõikes informatsioon puudub. Kahe erineva ajaperioodi võrdluses on erinevus veidi suurem. Sellegipoolest on katsekehad endiselt üsna suurel hulgal värvunud ehk katsekehad ei ole hoidmise perioodi lõpuks täielikult karboniseerunud.

Kuivtihedus

Pärast katsekehade hoidmisperioodi asetati katsekehad kuivatuskappi. Katsekehasid kaaluti regulaarselt ja kuivatati massi stabiliseerumiseni, mille alusel arvatati kuivtihedus (Tabelid 4.1.1 ja 4.1.2). Prismadel on rohkem tühimikke. Seetõttu võib lugeda silindritega saavutatud kuivtihedust usaldusväärsemaks.

Tabel 4.1.1 Krohvide silindrikujuliste katsekehade kuivtihedus

Katsekeha tüüp	Kuivmass (g)		Keskmine kuivmass (g)		Kuivtihedus (kg/m ³)		Keskmine kuivtihedus (kg/m ³)		Keskmine kuivtihedus (kg/m ³)		
	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	
Silinder	TK1	78,464	75,433	77	73	376,864	392,498	382	357	376	355
	TK2	71,947	74,686			374,360	373,067				
	TK3	80,035	73,838			384,410	354,645				
	TK4	78,904	66,542			394,136	307,765				
	TP1	71,428	66,483	72	67	356,793	345,929	355	340		
	TP2	71,256	65,969			355,934	343,255				
	TP3	71,779	69,696			344,756	348,141				
	TP4	75,15	67,336			360,947	323,416				
	K1-1	74,699	70,809	74	69	358,781	353,701	375	350		
	K1-2	74,343	66,023			386,827	329,794				
	K1-3	77,105	66,309			401,198	345,024				
	K1-4	71,035	74,137			354,830	370,325				
	K2-1	79,536	69,948	79	73	413,847	349,400	397	362		
	K2-2	82,096	72,055			410,081	346,081				
	K2-3	79,54	76,276			397,313	366,355				
	K2-4	73,264	74,509			365,964	387,690				
K3-1	79,038	70,398	80	71	365,561	366,300	371	365			
K3-2	76,619	74,603			368,002	372,652					
K3-3	85,828	67,915			382,788	368,744					
K3-4	79,41	70,593			367,281	352,622					

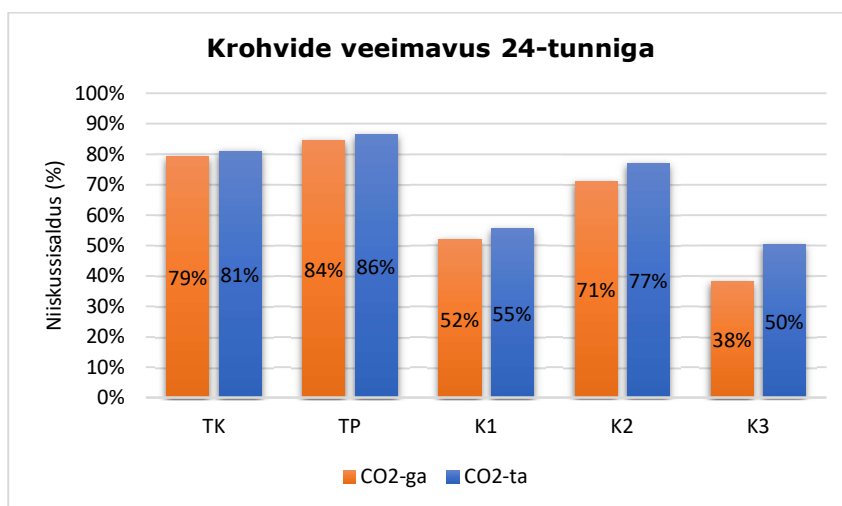
Tabel 4.1.2 Krohvide prismakujuliste katsekehade kuivtihedus

Katsekeha tüüp		Kuivmass (g)		Keskmine kuivmass (g)		Kuivtihedus (kg/m ³)		Keskmine kuivtihedus (kg/m ³)		Keskmine kuivtihedus (kg/m ³)	
		CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta
Risttahukas	TK1	85,726	84,676			334,867	330,766				
	TK2	84,724	84,206	86	85	330,953	328,930	338	333		
	TK3	88,93	86,589			347,383	338,238				
	TP1	80,736	84,329			315,375	329,410				
	TP2	78,178	80,949	79	83	305,383	316,207	310	323		
	TP3	79,267	82,439			309,637	322,027				
	K1-1	79,255	85,133			309,590	332,551				
	K1-2	81,934	90,349	80	88	320,055	352,926	314	342	330	340
	K1-3	80,087	87,295			312,840	340,996				
	K2-1	81,87	91,353			319,805	356,848				
	K2-2	88,838	90,037	85	91	347,023	351,707	333	354		
	K2-3	84,653	-			330,676	-				
	K3-1	88,019	88,796			343,824	346,859				
	K3-2	89,656	-	91	89	350,219	-	355	347		
	K3-3	94,983	-			371,027	-				

4.2. Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine

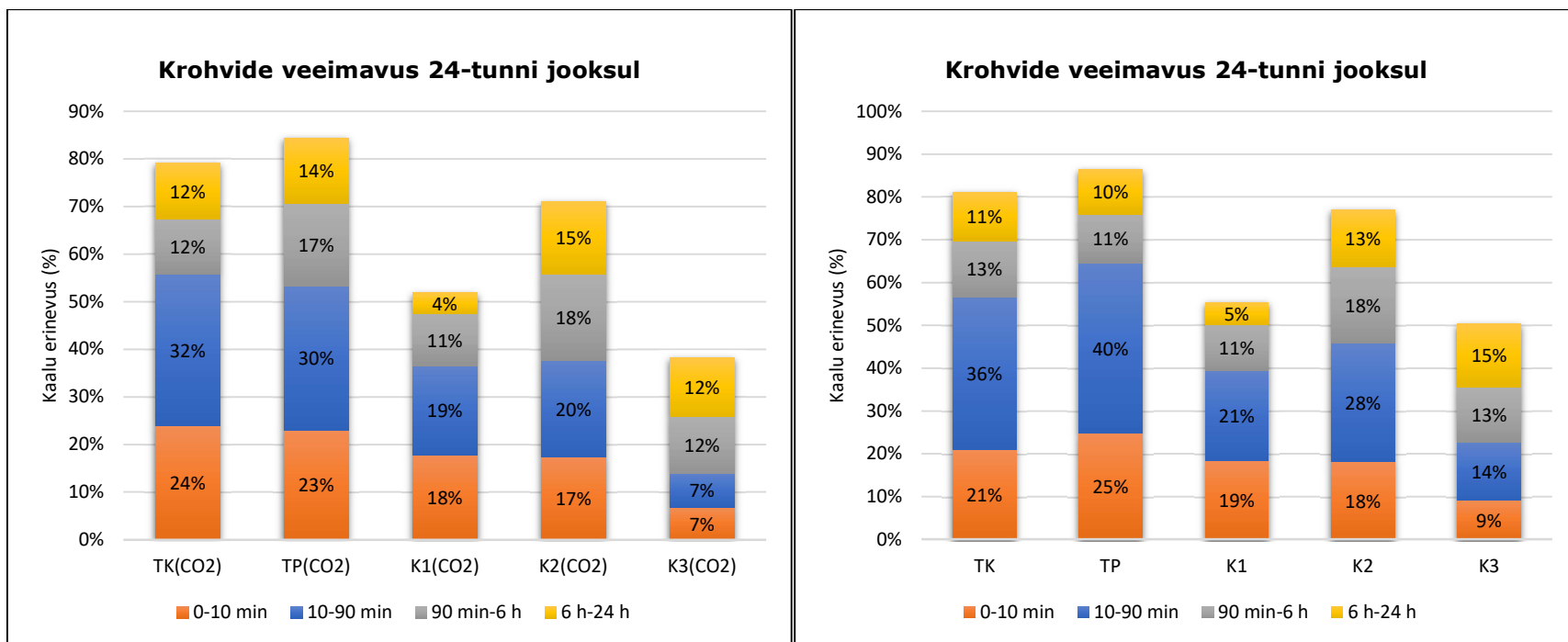
Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramise katsel fikseeriti katsekehade kaaluandmed 10-minuti, 90-minuti, 6-tunni ja 24-tunni vältel pärast vette kastmist (Tabelid L4.2.1 ja L4.2.2).

Katsekehade kaal tõusis 24-tunni jooksul vahemikus 38-86% katsekeha kohta. Kõige enam vett imasid krohvid TK, TP ja K2, kus kaalumuutus oli kõigil üsna ligilähedane. Krohvid K1 ja K3 imasid vett märgatavalt vähem. Lisaks saab täheldada, et katsekehad, mida oli hoidmise ajal rikastatud õhku manustatava süsihappegaasiga, imasid 24-tunni jooksul kokku vähem vett (Joonis 4.2.1).



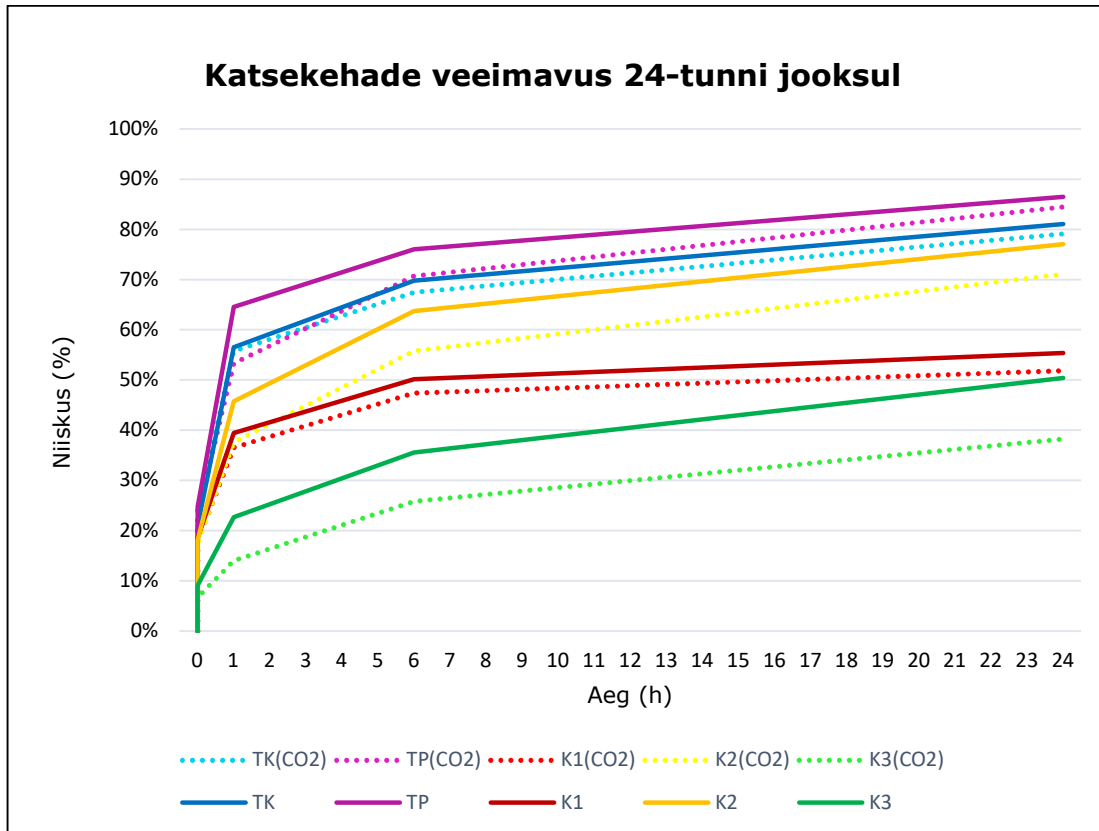
Joonis 4.2.1 Krohvide veeimavus katse vältel kokku

Katsekehade kaalumuutuse erisusi saab välja tuua ka vastavalt igale fikseeritud ajavahemikule (Joonis 4.2.2). Krohvide TK ja TP, K1 ja K2 veeimavus on olnud suurim vahemikus 90 minutit kuni 6 tundi. Krohvi K3 veeimavus on olnud suurim vahemikus 6 tundi kuni 24 tundi. Katse tulemusena ajateljel sarnanevad kõige enam üksteisele krohvid TK ja TP. Krohvi K2 veeimavus on erinevatel ajaetappidel kõige võrdväärsem ning krohvide K1 ja K3 veeimavuse määrad sõltuvalt ajast on üksteise suhtes pöördelised. Krohvi K1 veeimavus on viimase ajavahemiku raames märgatavalt langenud, seevastu krohvi K3 veeimavus märgatavalt tõusnud.



Joonis 4.2.2 Krohvide veeimavus kogu katses fikseeritud etappidel (vasakul CO₂-ga rikastatud katsekehad, paremal CO₂-ga rikastamata katsekehad)

Katse lõpuks (24-tunni möödudes) olid kõik katsekehad veega küllastunud. Esimese 90 minuti jooksul on katsekehade kaal hüppeliselt tõusnud. Kuigi katsekehad on märgatavalt kaalu kogunud ka ülejäänud katseajal, on selleks kulunud kordades rohkem aega (Joonis 4.2.3).



Joonis 4.2.3 Krohvide veemavus kogu katse vältel

Katsekehade veemavuskoeffitsient on krohvitüüpide lõikes üsna erinev ning jääb mitteremondimördi omaduste esitamise tingimuste kohaselt CO₂-ga rikastatud katsekehade puhul vahemikku 0,42-1,73 kg/(m²min^{0,5}), rikastamata katsekehade puhul vahemikku 0,77-2,09 kg/(m²min^{0,5}). Remondimördi arvutuste kohaselt jääb veemavus CO₂-ga rikastatud katsekehade puhul vahemikku 13,8-26,8 kg/m² (24 h veemavus) ja rikastamata katsekehade puhul vahemikku 17,8-28,3 kg/m². (24 h veemavus).

Tabel 4.2.1 Krohvide veeimavuse katse andmed ja veeimavuskoefitsiendid *w*

	Prismakujulised katsekehad									
	TK	TK(CO ₂)	TP	TP(CO ₂)	K1	K1(CO ₂)	K2	K2(CO ₂)	K3	K3(CO ₂)
Kaal katse alguses (g)	54,23	54,21	52,34	50,06	55,49	54,8	57,53	55,76	56,44	57,86
Kaal 10 min (g)	65,63	67,18	65,27	61,63	65,78	64,53	67,95	65,44	61,56	61,74
Kaal 90 min (g)	84,90	84,44	86,14	76,74	77,37	74,83	83,89	76,71	69,24	65,95
Kaalu kasv 10-90 min (g)	19,26	17,26	20,86	15,11	11,59	10,31	15,92	11,27	7,68	4,21
Kaalu kasv 24 h (g)	44,00	42,90	45,30	42,30	30,70	28,40	44,30	39,60	28,40	22,10
Koefitsient <i>w</i> kg/(m²min^{0.5}) (10-90 min)	1,93	1,73	2,09	1,51	1,16	1,03	1,59	1,13	0,77	0,42
Veeimavus <i>w</i> kg/m² (24 h)	27,5	26,8	28,3	26,4	19,2	17,8	27,7	24,8	17,8	13,8

4.3. Hügrokoopsete sorptsioonimaduste määramine

Hügrokoopse sorptsioonimaduste määramise katsel fikseeriti eelnevalt stabiliseerumiseni kuivatatud katsekehade kaaluandmed kahesuunaliselt (adsorptsioon/niiskumine, desorptsioon/kuivamine) neljal erineval õhu suhtelisel niiskusel: 30%, 50%, 75%, 95%. (Tabelid L4.3.1 kuni L4.3.4)

Hoidmise ajal CO₂-ga **rikastatud** katsekehade käitumine adsorptsioonil on üsna sarnane, arvestades nii läbivat graafiku kulgu kui ka iga etapi niiskuse sisaldust (Joonised 4.3.1 ja 4.3.2):

- 30% RH juures on katsekehade niiskus vahemikus 0,27-0,38 %.
- 50% RH juures on katsekehade niiskus vahemikus 0,54-0,75 %
- 75% RH juures on katsekehade niiskus vahemikus 1,20-1,64 %
- 95% RH juures on katsekehade niiskus vahemikus 3,87-4,56 %

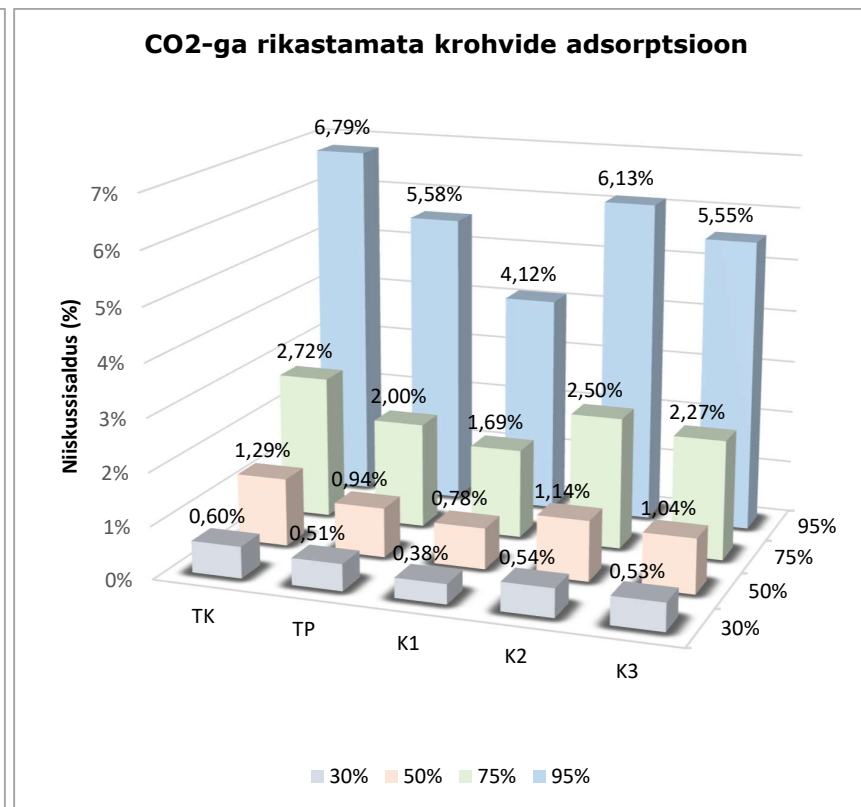
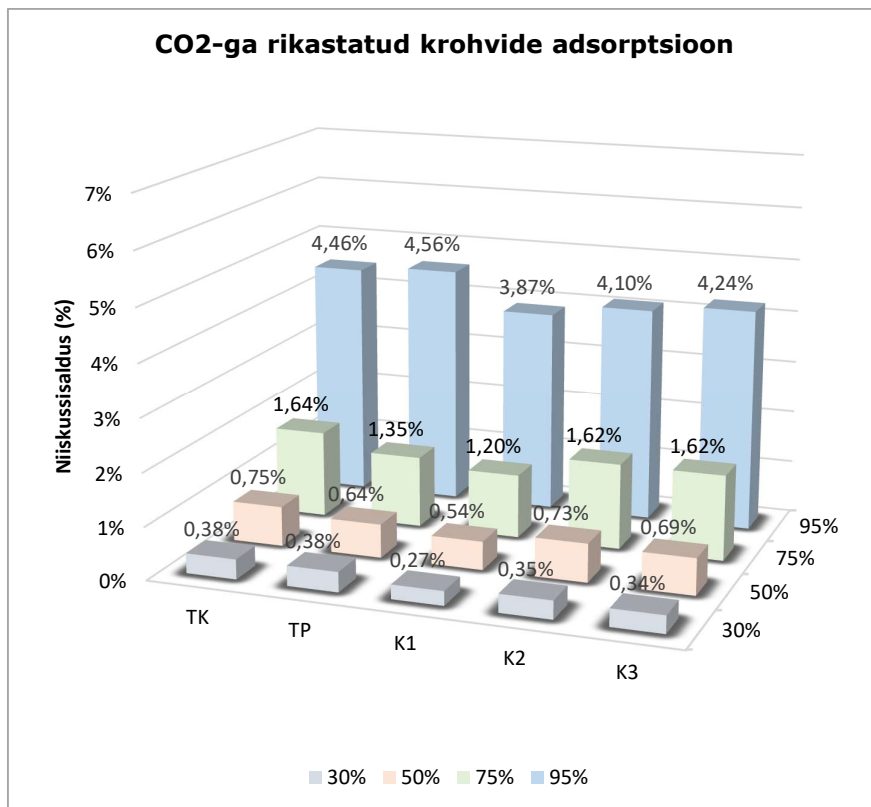
Krohvid TK, K2, K3 on väga sarnased. Krohvid TP ja K1 erinevad teistest vähesel määral. Krohv K1 on läbivalt kaalu kogunud kõige vähem, krohvi TP niiskus kasvab õhuniiskuse vahemikul 75-95% teistest rohkem.

Hoidmise ajal CO₂-ga **rikastamata** katsekehade käitumine adsorptsioonil on vähem sarnane, seda eelkõige niiskuse sisaldusel (Joonised 4.3.1 ja 4.3.2):

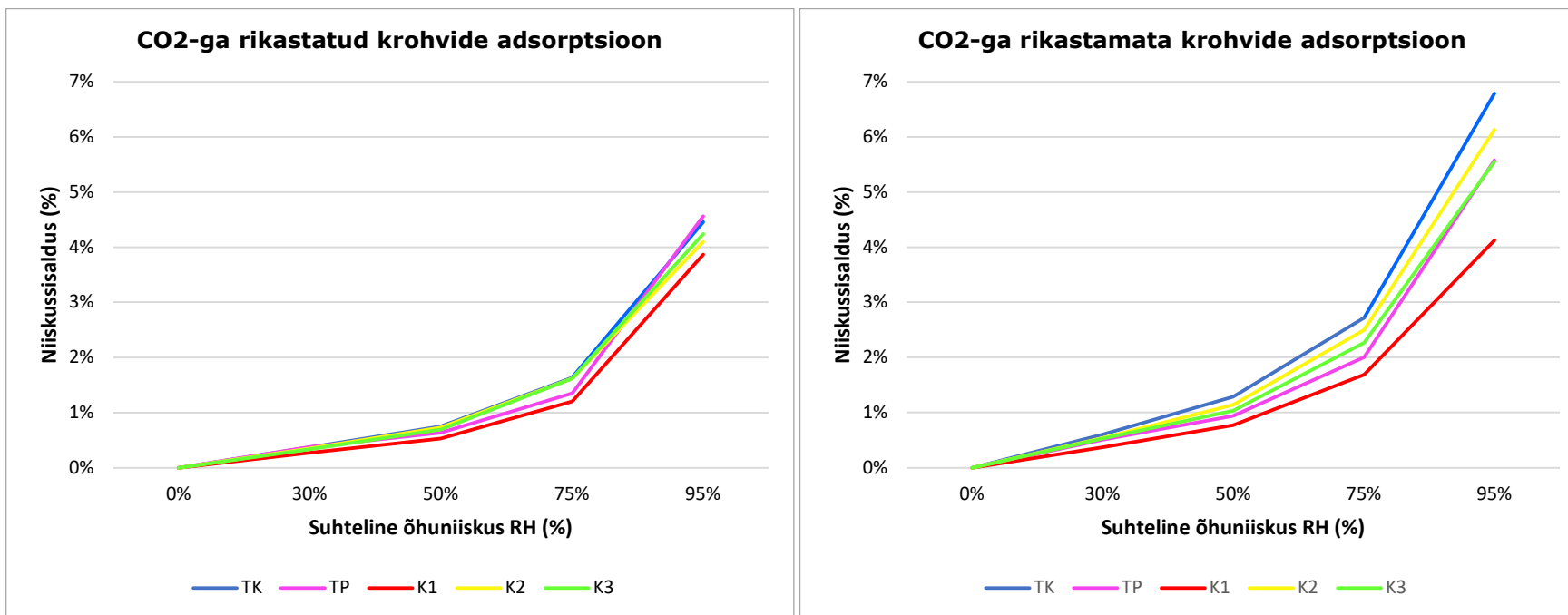
- 30% RH juures on katsekehade niiskuse sisaldus vahemikus 0,38-0,60 %.
- 50% RH juures on katsekehade niiskuse sisaldus vahemikus 0,78-1,29 %
- 75% RH juures on katsekehade niiskuse sisaldus vahemikus 1,69-2,72 %
- 95% RH juures on katsekehade niiskuse sisaldus vahemikus 4,12-6,79 %

Krohvide TK, K2, K3 adsorptsioon on kõigil üsna sarnane. Krohvid TP ja K1 erinevad teistest rohkemal määral. Krohv K1 on läbivalt kaalu kogunud kõige vähem, sealhulgas selle niiskuse kasv raugab märgatavalt õhuniiskusel 75-95%. Krohvi TP niiskus kasvab õhuniiskuse vahemikul 75-95% teistest veidi rohkem.

Ühtlasi on näha, et hoidmise ajal CO₂-ga **rikastatud** katsekehad sisaldavad adsorptsioonil kõikidel neljal fikseeritud suhtelise õhuniiskuse etappidel vähem niiskust, kui hoidmise ajal CO₂-ga **rikastamata** katsekehad.



Joonis 4.3.1 Krohvide adsorptsioon erinevatel suhtelise õhuniiskuse tasemetel (vasakul CO₂-ga rikastatud katsekehad, paremal CO₂-ga rikastamata katsekehad)



Joonis 4.3.2 Krohvide adsorptsioon kogu katseaja vältel (vasakul CO₂-ga rikastatud katsekehad, paremal CO₂-ga rikastamata katsekehad)

Katsekehade desorptsiooni graafikud on rohkem erinevad, seda nii omavahelises võrdluses kui ka hoidmise ajal CO₂-ga **rikastatud** ja **rikastamata** katsekehade võrdluses.

Hoidmise ajal CO₂-ga **rikastatud** katsekehade niiskusesisaldused on desorptsiooni graafikul järgmised (Joonised 4.3.3 ja 4.3.4):

- 30% RH juures on katsekehade niiskuse sisaldus vahemikus 0,74-1,74 %.
- 50% RH juures on katsekehade niiskuse sisaldus vahemikus 1,24-2,20 %
- 75% RH juures on katsekehade niiskuse sisaldus vahemikus 2,15-2,78 %

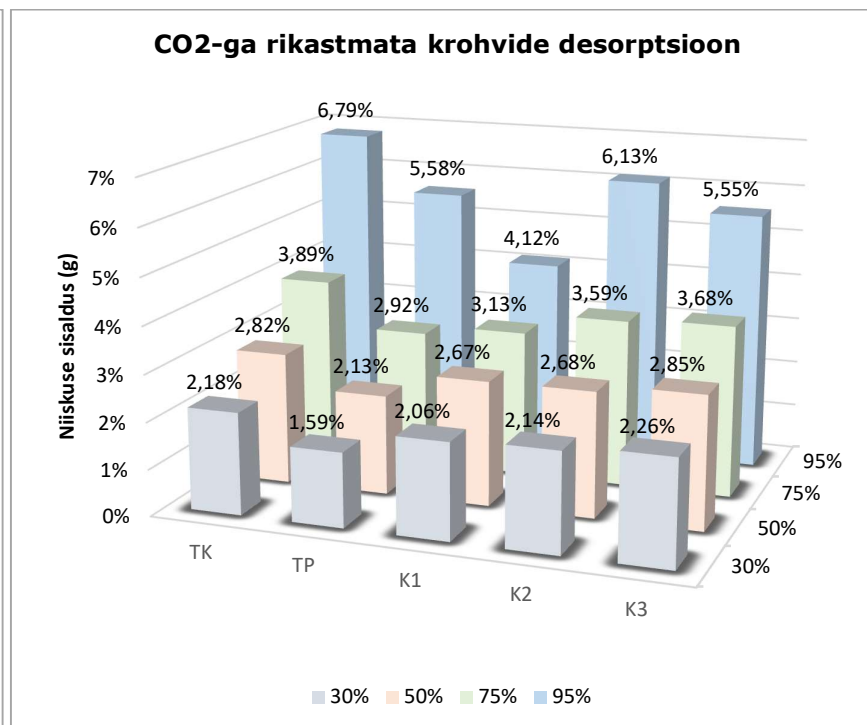
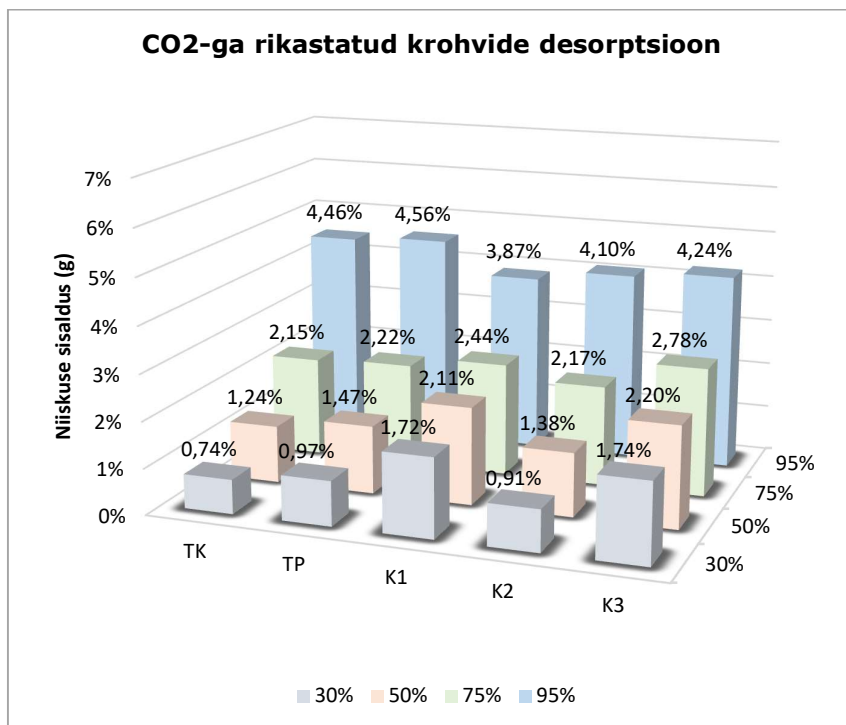
Krohvid TK, TP, K2 on desorptsioonil sarnased. Rohkem silma paistavad krohvid K1 ja K3, kus nende niiskus on õhuniiskusel 30-75% märgatavalt suurem ja graafik on märgatavalt laugem kui krohvide TK, TP ja K2 puhul.

Hoidmise ajal CO₂-ga **rikastamata** katsekehade niiskused on desorptsiooni graafikul järgmised (Joonised 4.3.3 ja 4.3.4):

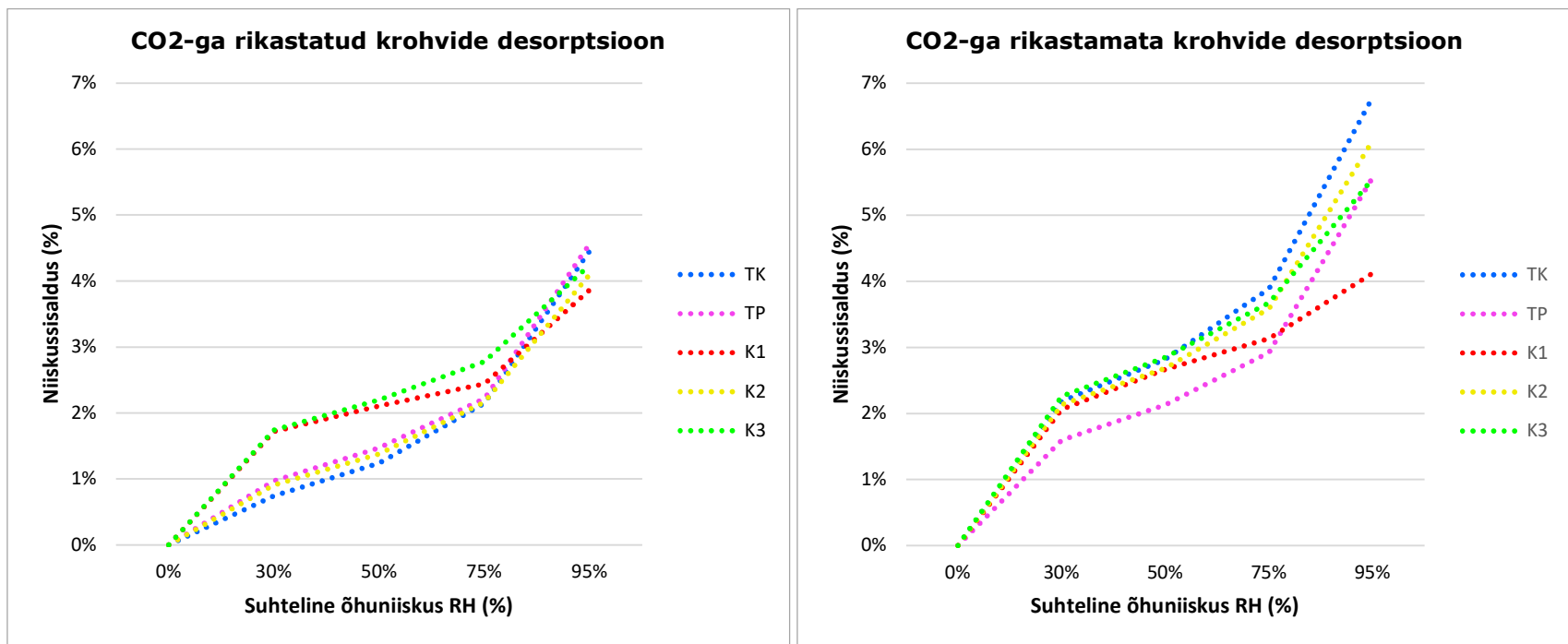
- 30% RH juures on katsekehade niiskus vahemikus 1,59-2,26 %.
- 50% RH juures on katsekehade niiskus vahemikus 2,13-2,85 %
- 75% RH juures on katsekehade niiskus vahemikus 2,92-3,89 %

Krohvid TK, K2 on desorptsioonil sarnased. Rohkem paistavad silma krohvid TP, K1, K3. Krohv TP niiskuse sisaldus on peaaegu kõikidel etappidel kõige väiksem. Krohvide K1 ja K3 graafik raugneb õhuniiskusel 75-95% teistest rohkem.

Kõikide katsekehade tõusunurk on peaaesjalikult kõige laugem vahemikus 30-75%.



Joonis 4.3.3 Krohvide desorptsioon erinevatel suhtelise õhuniiskuse tasemetel (vasakul CO₂-ga rikastatud katsekehad, paremal CO₂-ga rikastamata katsekehad)



Joonis 4.3.4 Krohvide desorptsioon kogu katseaja vältel (vasakul CO₂-ga rikastatud katsekehad, paremal CO₂-ga rikastamata katsekehad)

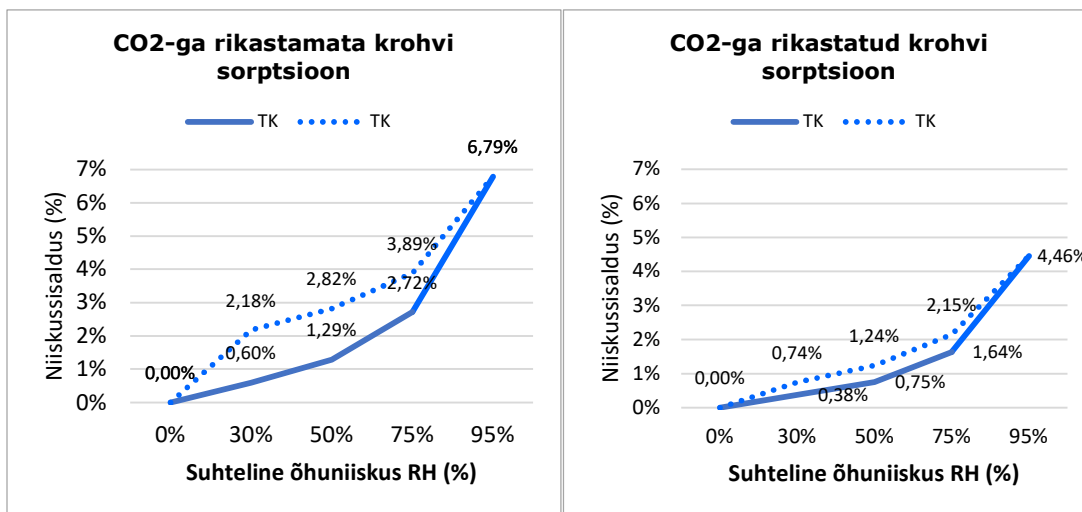
Hoidmise ajal CO₂-ga **rikastatud** katsekehade käitumine adsorptsiooni ja desorptsiooni võrdluses on sarnasemad, kui hoidmise ajal CO₂-ga **rikastamata** katsekehad. Arvestades seejuures nii läbivat graafiku kulgu kui ka iga etapi suhtelist õhuniiskust.

Hoidmise ajal CO₂-ga **rikastamata** katsekehade puhul on sarnasemad TK, K2 ja K3. Rohkem eristuvad krohvid TP ja K1. Krohvi TP adsorptsiooni ja desorptsiooni niiskusevahemik on kõige väiksem, seevastu krohvi K1 graafikute niiskusevahemik on kõige suurem.

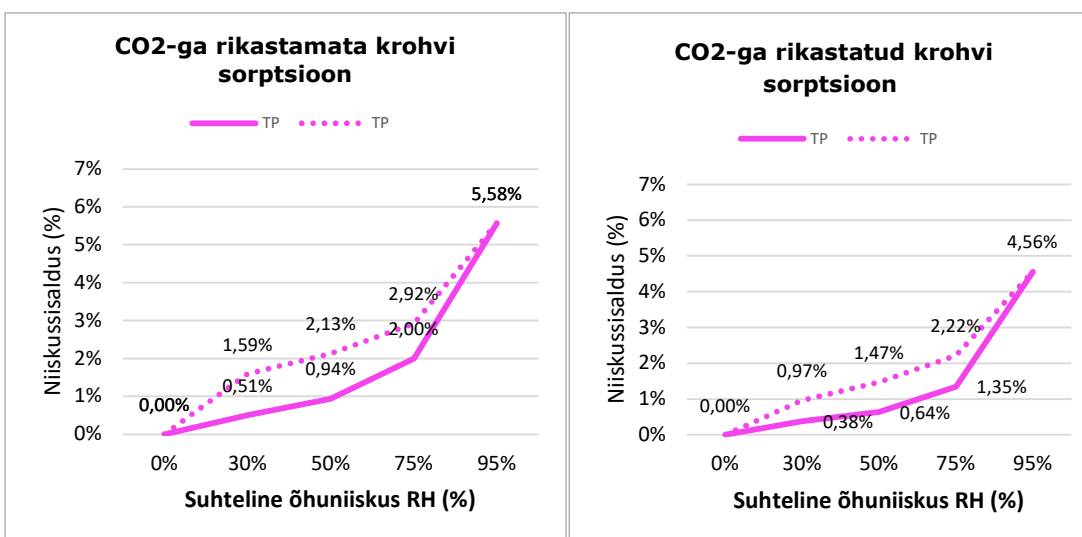
Hoidmise ajal CO₂-ga **rikastatud** katsekehade puhul on sarnasemad TK, TP, K2, kus niiskusvahemikud on kõigil väiksemad. Rohkem eristuvad krohvid K1 ja K3, kus niiskusvahemikud sarnanevad pigem CO₂-ga **rikastamata** katsekehadega.

Tabel 4.3.1 Krohvide niiskusesisaldus adsorptsiooni ja desorptsiooni võrdluses

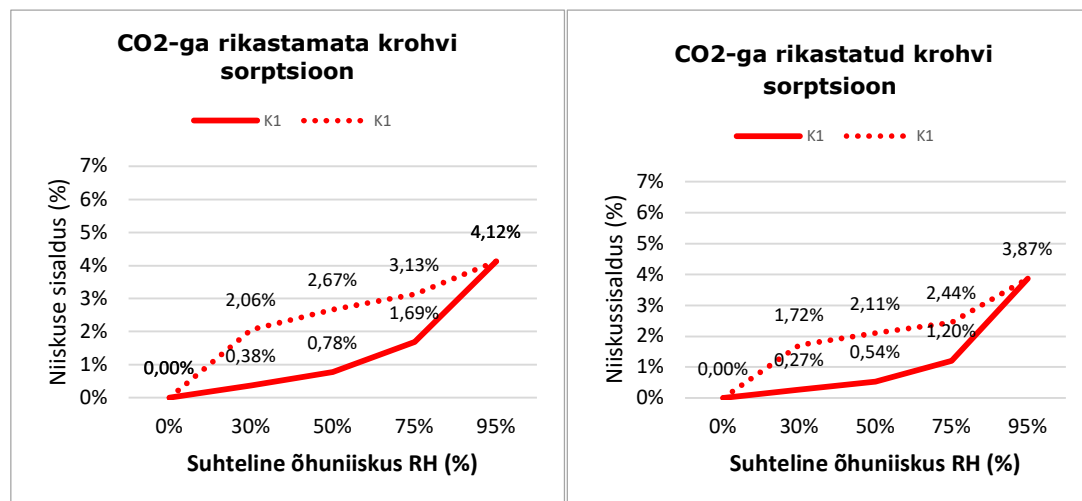
Krohvide niiskus adsorptsiooni ja desorptsiooni võrdluses							
RH %	Tüüp	Protsess	Krohv				
			TK %	TP %	K1 %	K2 %	K3 %
30%	CO ₂ -ga	Adsorptsioon	0,38	0,38	0,27	0,35	0,34
		Desorptsioon	0,74	0,97	1,72	0,91	1,74
	CO ₂ -ta	Adsorptsioon	0,60	0,51	0,38	0,54	0,53
		Desorptsioon	2,18	1,59	2,06	2,14	2,26
50%	CO ₂ -ga	Adsorptsioon	0,75	0,64	0,54	0,73	0,69
		Desorptsioon	1,24	1,47	2,11	1,38	2,20
	CO ₂ -ta	Adsorptsioon	1,29	0,94	0,78	1,14	1,04
		Desorptsioon	2,82	2,13	2,67	2,68	2,85
75%	CO ₂ -ga	Adsorptsioon	1,64	1,35	1,20	1,62	1,62
		Desorptsioon	2,15	2,22	2,44	2,17	2,78
	CO ₂ -ta	Adsorptsioon	2,72	2,00	1,69	2,50	2,27
		Desorptsioon	3,89	2,92	3,13	3,59	3,68
95%	CO ₂ -ga	Sorptsioon	4,46	4,56	3,87	4,10	4,24
	CO ₂ -ta	Sorptsioon	6,79	5,58	4,12	6,13	5,55



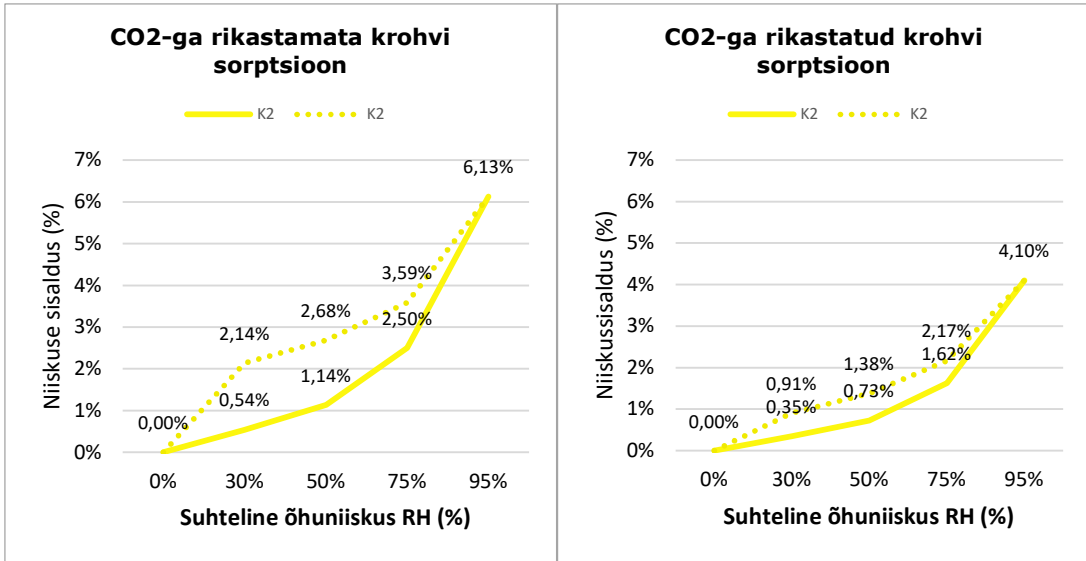
Joonis 4.3.5 Krohvi TK sorptsioon



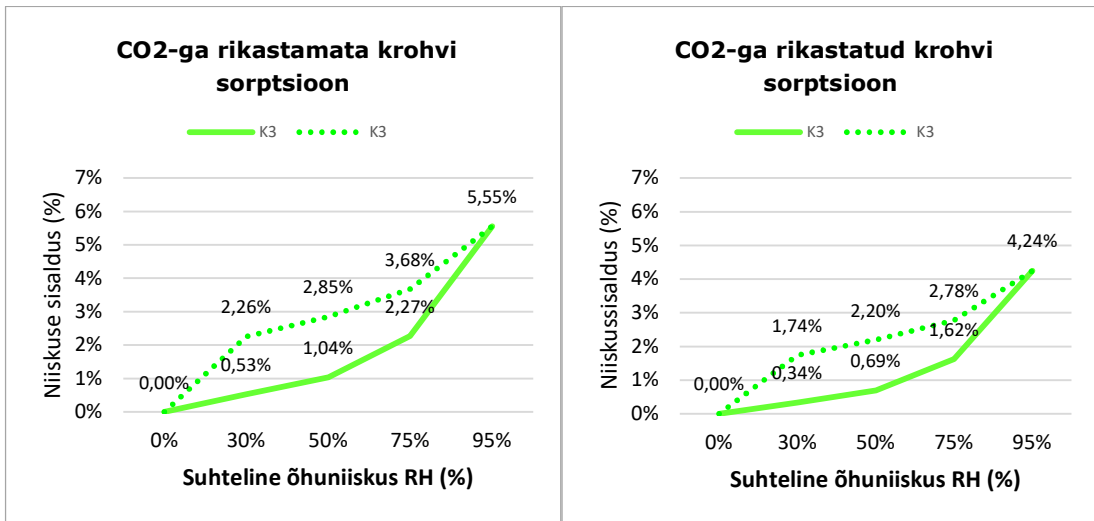
Joonis 4.3.6 Krohvi TP sorptsioon



Joonis 4.3.7 Krohvi K1 sorptsioon



Joonis 4.3.8 Krohvi K2 sorptsioon



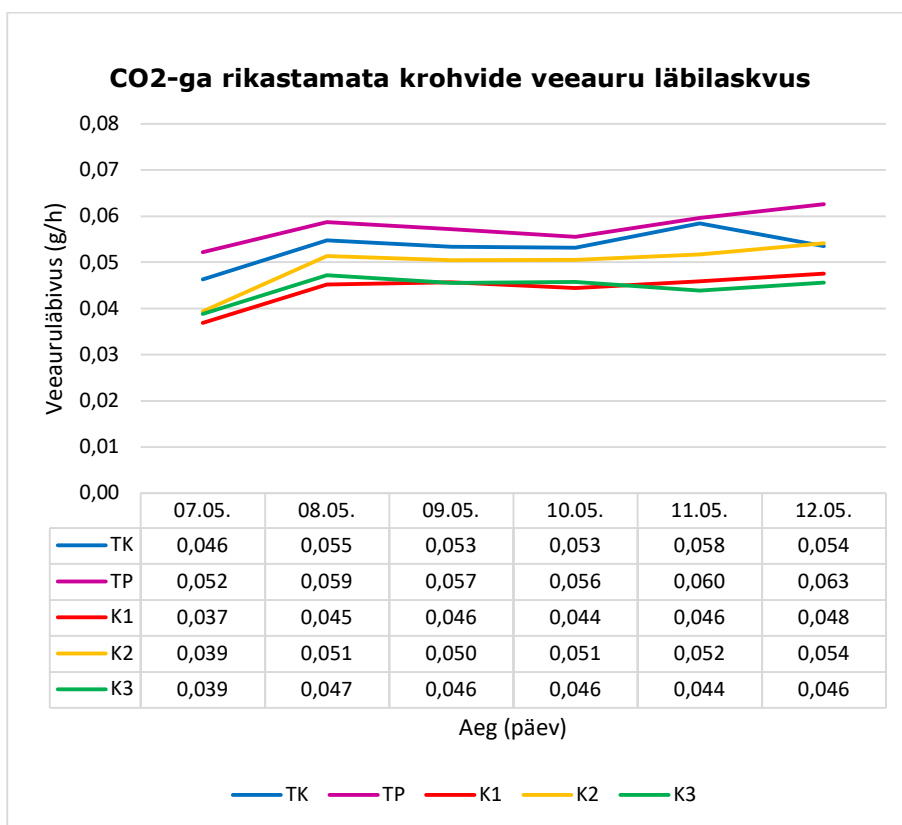
Joonis 4.3.9 Krohvi K3 sorptsioon

4.4. Veeauru läbilaskvuse määramine

Veeauru läbilaskvuse omaduste määramise katsel fikseeriti katsekehade kaaluandmed üks kord päevas kuni kaalu muudu stabiliseerumiseni. Selleks kaaluti katsekehasid kokku 6 päeva. Osade katsekehade tulemused (märgitud punasega) erinesid teistest märgatavalt, mistõttu neid käesoleva tulemuste esitamisel ei arvestatud (Tabelid L4.4.1 ja L4.4.2). Katsekehade veeauruläbivus kogu katseaja perioodi vältel oli keskmiselt vahemikus 0,44-0,66 g/h. Kivinemise ajal CO₂-ga rikastatud katsekehade keskmine veeauruläbivus oli kõikidel fikseeritud kordadel suurem.

CO₂-ga rikastamata katsekehade käitumisest katsel tuleb esile selge erinevus, kus krohvide keskmise veeauru läbivuse kogu katse ulatuses saab esitada kasvavas järjekorras (Joonis 4.4.1):

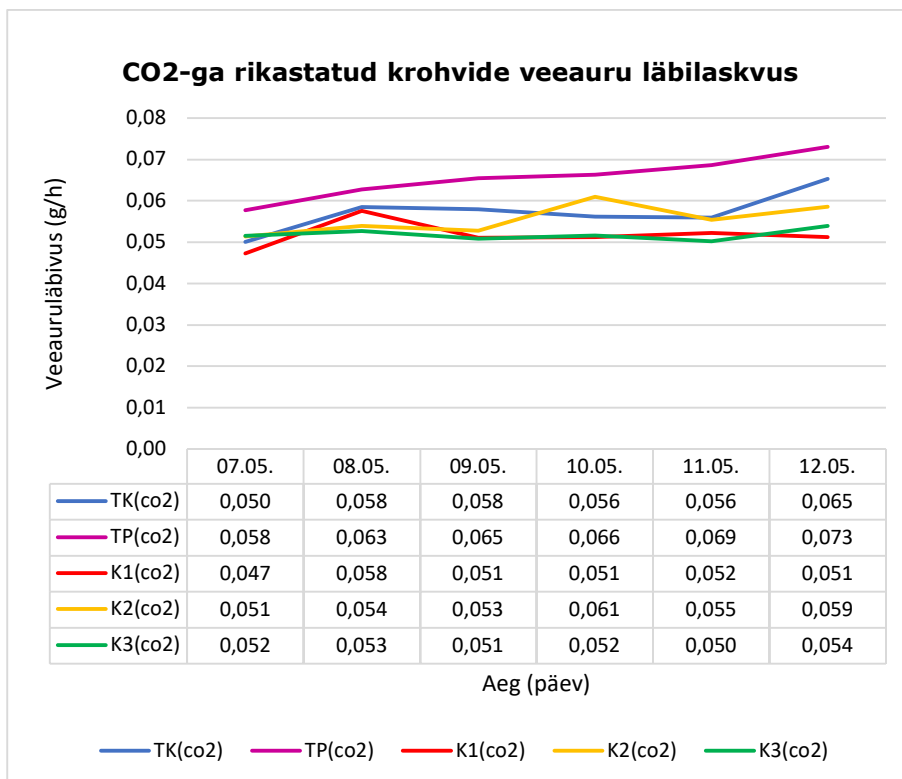
- K1 ja K3 – 0,044 g/h
- K2 – 0,050 g/h
- TK – 0,053 g/h
- TP – 0,058 g/h



Joonis 4.4.1 CO₂-ga rikastamata katsekehade veeauru läbilaskvus ajas

Hoidmise ajal CO₂-ga rikastatud katsekehade käitumisest katsel nii selget erinevust kogu katse ulatuses esile ei tule. Sellegipoolest saab ka siin esitada krohvide keskmise veeauru läbivuse kogu katse arvestuses kasvas järjekorras (Joonis 4.4.2):

- K1 ja K3 – 0,052 g/h
- K2 – 0,055 g/h
- TK – 0,057 g/h
- TP – 0,66 g/h



Joonis 4.4.2 CO₂-ga rikastatud katsekehade veeauru läbilaskvus ajas

Difusioonitakistusteguri ja veeauru erijuhtivuse määramiseks on arvestatud tulemusi vahemikus 08.05-12.05 (Tabel 4.4.1).

Tabel 4.4.1 Krohvide veeauru erijuhtivus, difusioonitakistustegur ja materjalikihi aurutakistus

	CO ₂ -ga					CO ₂ -ta				
	TK	TP	K1	K2	K3	TK	TP	K1	K2	K3
Veeauru erijuhtivus δ 10E-11 kg/(m·s·Pa)	4,3	4,9	3,8	4,1	4,0	4,0	4,2	3,3	3,7	3,2
Difusioonitakistustegur μ	4,7	4,1	5,3	4,9	5,0	5,0	4,7	6,2	5,5	6,3
Materjalikihi (25 mm) aurutakistus S_d (m)	0,12	0,10	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12	0,15	0,13	0,15

5. ARUTELU

5.1. Krohvide niiskustehnilised omadused ja lisaainete mõju niiskustehnilistele omadustele

Käesoleva uurimistöö raames valmistati viie sarnase koostisega lubjapõhistest soojusisolatsioonkrohvidest katsekehad, millega tehti katseid. Teostatud katsete tulemusena saadi lubjapõhiste soojusisolatsioonkrohvide niiskustehnilised omadused (Tabel 5.1.1).

Tabel 5.1.1 Katsetulemuste koondandmed

Omadused			Lubjapõhine soojusisolatsioonkrohv									
			TK		TP		K1		K2		K3	
			CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta	CO ₂ -ga	CO ₂ -ta
Kapillaarne veeimavus	Niiskus %	10 min	24	21	23	25	18	19	17	18	7	9
		90 min	56	57	53	65	37	39	38	46	14	23
		6 h	67	70	71	76	38	50	56	64	26	36
		24 h	79	81	84	86	52	55	71	77	38	50
Kapillaarne veeimavus	Veeimavuskoeffitsient w mitterremondimört kg/(m ² min ^{0,5})		1,73	1,93	1,51	2,09	1,03	1,16	1,13	1,59	0,42	0,77
		Veeimavus w remondimört kg/m ² (24 h)	26,8	27,5	26,4	28,3	17,8	19,2	24,8	27,7	13,8	17,8
Sorptsioonniiskus %	0-30 %	adsorptsioon	0,38	0,6	0,38	0,51	0,27	0,38	0,35	0,54	0,34	0,53
		desorptsioon	0,74	2,18	0,97	1,59	1,72	2,06	0,91	2,14	1,74	2,26
	0-50 %	adsorptsioon	0,75	1,29	0,64	0,94	0,54	0,78	0,73	1,14	0,69	1,04
		desorptsioon	1,24	2,82	1,47	2,13	2,11	2,67	1,38	2,68	2,2	2,85
0-75 %	adsorptsioon	1,64	2,72	1,35	2	1,2	1,69	1,62	2,5	2,78	2,27	
	desorptsioon	2,15	3,89	2,22	2,92	2,44	3,13	2,17	3,59	4,24	3,68	
0-95 %	sorptsioon	4,46	6,79	4,56	5,58	3,87	4,12	4,1	6,13	4,24	5,55	
Veeauru läbilaskvus	Difusioonitakistustegur μ		4,7	5,0	4,1	4,7	5,3	6,2	4,9	5,5	5,0	6,3
		Materjalikihi aurutakistus S_d (m)	0,12	0,13	0,10	0,12	0,13	0,15	0,12	0,13	0,13	0,15

Käesolevas uurimistöö tulemustena selgus, et erineva lisaainega niiskustehnilised omadused on erinevad. Seega lisaained mõjutavad krohvide niiskustehnilisi omadusi. Tabelist 5.1.1 on näha, et silaani lisamine on oluliselt (kordades) vähendanud krohvide veeimavust (0,42-0,77 vs 1,03-2,09 kg/(m²min^{0,5}). Samas veeauruläbilaskvust määravad omadused varieeruvad oluliselt vähem ($\mu=5,0-6,3$ K3 vs $\mu=4,1-6,2$ ülejäänud) ja sõltuvad pigem karboniseerumisest (4,1-5,3 vs 4,7-6,3).

Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine

Krohvide omavahelises võrdluses imasid kõige vähem vett krohvid K3 ja K1, mille veeimavuskoefitsient on kõige väiksem. Kõige rohkem vett imasid krohvid TP, TK ja K2, kuigi viimase veeimavuskoefitsient on esimestega võrreldes väiksem. Seega saab järeldada, et valge tsemendi (K1) ja suurem silaani (K3) sisaldus vähendavad krohvide veeimavusvõimet suuremal määral. Vähene silaani (K2) sisaldus vähendab krohvi veeimavusvõimet vähesel määral.

Kermo Jürmann viitab oma uurimistöös [45] seosele, et suurem lubisideaine hulk tekitab mõrdis korrapärasema struktuuriga mikroõhumullid, mille tulemusena veeimavus langeb. Kuigi antud töö raames ei ole koostisainete koguseid esitatud, võib ka see mõjutada niiskustehnilisi omadusi.

Võrdluseks käesolevale uurimusele saab välja tuua erinevate ehitusmaterjalide veeimavuskoefitsiente:

- termokrohv Diathonite Evolution: $w = 0,90 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ [46]
- kanepibetoon jämeda fraktsiooniga: $w = 1,41-1,45 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ [47]
- kanepibetoon peene fraktsiooniga: $w = 1,86-1,90 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ [47]
- traditsiooniline lubimört: $w = 2,36 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ [48]
- kasutatud betoon: keskmine niiskus 4,4-6,9 % [49]

Arvestades eelnimetatud uuringuid saab järeldada, et käesolevas uurimistöös kasutatud krohvid TK ja TP sarnanevad pigem traditsioonilisele lubimördile või peene fraktsiooniga kanepibetoonile. Samas krohvid K1, K3 sarnanevad termokrohvile Diathonite Evolution. Krohv K2 on kohati sarnane nii jämeda fraktsiooniga kanepibetoonile kui ka termokrohvile Diathonite Evolution. Betooni niiskus on märkimisväärselt väiksem, mis põhjendab ka asjaolu, et tsement vähendab krohvi veeimavust.

Lisaks saab eraldi välja tuua koostisosade mõju niiskumise dünaamikale, kus:

- silaaniga krohvi niiskumine on väiksem katse alguses ja suurem katse lõpus, mida illustreerib tulemuste graafikul krohv K2 ja K3
- valge tsemendiga krohvi niiskumine on suurem katse alguses ja väiksem katse lõpus, mida illustreerib tulemuste graafikul krohv K1

Sarnaseid uurimusi käesoleva töö autor võrdlemiseks ei leidnud.

Hügroskoopsete sorptsiooniomaduste määramine

Krohvide omavahelises võrdluses oli krohvide käitumine adsorptsioonil üsna sarnane. Sellegipoolest enamikul etappidel oli kõige väiksem niiskuss krohvil K1 ja TP, kõige

suurem krohvil TK. Kusjuures krohvi K1 veeauru imavus langes viimasel etapil teistega võrreldes enim, samas krohvi TP veeauru imavus tõusis enim.

Krohvide omavahelises võrdluses oli krohvide käitumine desorptsioonil vähem sarnane. Enamikul etappidel oli kõige suurem niiskus krohvil K1 ja K3, kõige väiksem krohvil TP. Seega käesoleva töö katsete puhul saab järeldada, et valge tsemendi sisaldus krohvis vähendab krohvi niiskumist ja kuivamist. Suurem silaani sisaldus vähendab krohvi kuivamist ja lubjapasta sisaldus vähendab krohvi niiskumist, kuid suurendab kuivamist.

Ülejäänud võrdlustes sedavõrd selget joont ei teki, kuna CO₂-ga **rikastatud** ja **rikastamata** katsekehad käituvad erinevalt.

Võrdluseks käesolevale uurimusele saab välja tuua erinevate materjalide niiskuse sorptsioonil (adsorptsioon/desorptsioon):

- peene fraktsiooniga kanepibetooni niiskus [47]:
 - RH 30% - 2,4-3,1 % / 2-3% suurem niiskusest adsorptsioonil
 - RH 50% - 3,5-3,6 % / 2-3% suurem
 - RH 75% - 5,3-5,4 % / 2-3% suurem
 - H 95% - 14,9-16,0 %
- jämeda fraktsiooniga kanepibetooni niiskus [47]:
 - RH 30% - 2,4-3,1 % / 2-3% suurem
 - RH 50% - 4,3-4,6% / 2-3% suurem
 - RH 75% - 6,6-7,0 % / 2-3% suurem
 - RH 95% - 14,9-16,0 %
- paberkrohvide niiskuss [50]:
 - RH 30% - 3,3-4,8 % / 4,4-6,5 %
 - RH 50% - 4,9-7,3 % / 6,2-9,3 %
 - RH 75% - 7,8-11,5 % / 9,4-13,9 %
 - RH 95% - 15,2-22,0 %

Arvestades eelnimetatud uuringuid saab järeldada, et käesolevas uurimistöös kasutatud krohvide niiskus sorptsioonil on väiksem nii kanepibetoonist kui ka paberkrohvist.

Kui krohve kasutada sisekrohvidena, on oluline ka krohvi niiskuspuhverduse võime (Moisture Buffering Value MBV), mille määramiseks on välja töötatud nn Nordtest metoodika [51], kus ehitusmaterjale katsetakse tsükliliselt niiskust reguleerides (enamasti 8 h RH=75% ja 16 h RH=33%).

Käesolevas töös vastavat katset läbi ei viidud, kuid materjali võimest niiskust siduda ja loovutada saab ülevaate, kui määrata materjali veesisalduse muutus pinnaühiku kohta (Tabel 5.1.2).

Kui tõsta (järsult) suhtelist õhuniiskust vahemikus RH=50-75%, on ööpäevane veesisalduse juurdekasv 44,6-99,4 g/m². Kui õhuniiskus langeb (RH=75-50%), võib vabaneva veeauru kogus olla 28,6-95,6 g/m². Selline omadus aitab tasandada õhuniiskuse kõikumist ruumides. Tsemendi lisandiga krohv K1 eristub selgelt teistest madalamate väärtustega.

Tabel 5.1.2 Veesisalduse muutus suhtelise õhuniiskuse tõstmisel/langetamisel esimese 24 h jooksul

	Veesisalduse juurdekasv/loovutus 24 h g/m ²			
	CO ₂ -ta		CO ₂ -ga	
	50-75%	75-50%	50-75%	75-50%
TK	99,4	95,6	69,7	80,2
TP	72,4	64,9	63,4	62
K1	65,1	40,7	44,6	28,6
K2	92,3	81,5	68,5	71,3
K3	91,1	77,8	62,5	51,3

Veeauru läbilaskeomaduste määramine

Krohvide omavahelises võrdluses tuli ilmseks, et iga koostisosa mõjutas katse tulemusi ühel või teisel viisil. Krohvide K1 ja K3 veeauruläbivus oli kõige väiksem ehk difusioonitakistustegur kõige suurem. Seevastu krohvi TP veeauruläbivus oli kõige suurem ehk difusioonitakistus kõige väiksem. Krohvi K2 veeauruläbivus oli CO₂-ga **rikastatud** ja **rikastamata** katsekehadel erinev.

Seega antud tulemuste põhjal saab järeldada, et valge tsement ja suurem silaani kogus krohvis vähendavad suuremal määral krohvide veeauruläbivust. Vähene silaani kogus võib vähendada vähesel määral krohvi veeauruläbivust ning lubjapasta sootuks suurendab veeauruläbivust.

Võrdluseks käesolevale uurimusele saab välja tuua erinevate krohvide difusioonitakistustegureid:

- kanepibetoon jämeda fraktsiooniga: $\mu = 4,0-4,4$ [47]
- kanepibetoon peene fraktsiooniga: $\mu = 3,5-3,8$ [47]
- mittekarboniseerunud lubikrohv: $\mu = 8,9$ [52]
- paberkrohv: $\mu = 2,30-3,23$ [50]
- oliivkiududega savikrohv: $\mu = 12,5-13,4$ [53]

Arvestades eelnimetatud uuringuid saab järeldada, et käesolevas uurimistöös kasutatud krohvide difusioonitakistus on suurem paberkrohvist ja kanepibetonist, aga väiksem lubikrohvist ja oliivkiududega savikrohvist.

Krohviliigid

Kuigi see polnud töös püstitatud ülesannete hulgas, võrreldi tulemusi ka standardis EVS-EN 998-1:2016 [54] kajastatud erinevate kivistunud krohvimörtide liikide ja nende omadustele nõuetega. Käesolevas uurimistöös on kõnealusemad standardis kajastuvad kergkrohvimört LW, remondimört R ja soojustumört T (Tabel 5.1.3).

Tabel 5.1.3 Standardis EVS-EN 998-1:2016 kivistunud mörtidele esitatavad nõuded

Omadused	Krohvitiübid		
	Kergkrohvimört LW	Remondimört R	Soojustusmört T
Kapillaarne veeimavuskoefitsient w	$W_{c0}; W_{c1}; W_{c2}$ (spetsifitseerimata; $w \leq 0,40; w \leq 0,20$) $\text{kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0,5})$	$\geq 0,3$ kg/m^3	W_{c1} $w \leq 0,40$
Veeauruläbivustegur μ	\leq deklareeritud väärtus	≤ 15	≤ 15

Käesoleva standardi kohaselt saab kõiki uurimistöös katsetatud krohve veeimavuskoefitsiendi ja veeauruläbivuse alusel liigitada kergkrohvimördiks ja remondimördiks, kuna need väärtused jäävad lubatud piiridesse. Kapillaarne veeimavuskoefitsient oli mõnel juhul standardis toodust soojustumördi tingimusest (W_{c1}) kõrgem. Rohke silaani lisamine krohvile (K3, CO₂-ga rikastatud) viis veeimavuse näitajad vastavusse standardi EVS-EN 998-1:2016 klassile W_{c1} - keskmine koefitsient oli 0,42 $\text{kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0,5})$. Kõige rohkem alandasid katsetes kasutatud krohvide veeimavust lisaained silaan ja valge tsement. Uuringut võiks jätkata ning suurendada veelgi lisaainete silaani või valge tsemendi kogust mördis.

5.1. Karboniseerumise mõju niiskustehnilistele omadustele

Krohvidest valmistatud katsekehad jaotati ära kahe ruumi vahel, et võrrelda ka süsihappegaasi mõju niiskustehnilistele omadustele. Karboniseerumisprotsessi jälgiti fenoolftaleiini lahusega ja katsekehade kaaluandmete muutuse põhjal. Sellise meetodi tulemusena selgus, et süsihappegaasil on mõju katsekehade karboniseerumisastmele ja niiskustehnilistele omadustele.

CO₂-ga **rikastatud** katsekehad alustasid varem kaalu tõusu ja stabiliseerusid kiiremini. Fenoolftaleiini lahusega kontrollides oli CO₂-ga **rikastatud** katsekehade tonaalsus vähem kontrastne. Seega toetudes tulemustele ja teooriale saab järeldada, et suurem süsihappegaasi kontsentratsioon õhus kindlal õhutemperatuuril ja suhtelisel õhuniiskusel kiirendab lubjapõhiste krohvide karbonaatset kivinemist.

Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramine

Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramise katse põhjal selgus, et kõikidel fikseeritud aegadel (10 minutit, 90 minutit, 6 tundi, 24 tundi) imasid CO₂-ga **rikastatud** ja CO₂-ga **rikastamata** katsekehad erineval hulgal vett, kusjuures CO₂-ga **rikastatud** katsekehade veeimavus oli kõikidel etappidel väiksem.

Hügroskoopsete sorptsiooniomaduste määramine

Hügroskoopsete sorptsiooniomaduste määramise katse põhjal selgus, et kõikidel fikseeritud suhtelise õhuniiskuse tasemetel (30%, 50%, 75%, 95%) sisaldasid CO₂-ga **rikastatud** ja CO₂-ga **rikastamata** katsekehad erineval hulgal veeauru, kusjuures CO₂-ga **rikastatud** katsekehade niiskuse sisaldus oli kõikidel õhu suhtelise niiskuse etappidel väiksem.

Samuti selgus, et CO₂-ga **rikastatud** katsekehade niiskuse erinevus adsorptsiooni ja desorptsiooni võrdluses oli väiksem, mis tähendab, et need langetasid kuivamisel rohkem kaalu, kui CO₂-ga **rikastamata** katsekehad.

Veeauru läbilaskeomaduste määramine

Veeauru läbilaskeomaduste määramise katse põhjal selgus, et kõikidel fikseeritud aegadel kaotasid CO₂-ga **rikastatud** ja CO₂-ga **rikastamata** katsekehad erineval hulgal kaalu, kusjuures CO₂-ga **rikastatud** katsekehade veeauruläbivus oli kõikidel etappidel suurem.

Katsekehasid rikastati CO₂-ga regulaarselt ja režiim on võrreldav halvasti ventileeritud eluruumi kasutamisega, kus CO₂ kontsentratsioon ruumis tõusis aegajalt 2000 või 3000

ppm tasemele. Reaalsetes tingimustes on olukord ilmselt katsetes kasutatud režiimide vahepealne.

Järeldused ja võimalikud põhjused

Need tulemused viitavad asjaolule, et süsihappegaasi kontsentratsioon materjalide kivilinisel mõjutab materjalide hilisemaid niiskustehnilisi omadusi. Sarnasele asjaolule viitab ka 2008. aasta uurimus [14], kus selgus, et kõrgema süsihappegaasi kontsentratsiooniga õhus tekkisid suurema fraktsiooniga kaltsiumkarbonaadi kristallid, kui väiksema süsihappegaasi kontsentratsiooniga õhus. Lisaks vähenes väiksema fraktsiooniga kaltsiumhüdroksiidi kristallide hulk.

Uurimistöös [47], kus kergeks täitematerjaliks on orgaaniline kanepiluu, on autor kapillaarse veeimavuskatse põhjal avaldanud, et jämedama fraktsiooniga mördi veeimavus on väiksem kui peene fraktsiooniga. See võib kinnitada asjaolu, et CO₂-ga **rikastamise** tulemusel tekkisid karboniseerumisprotsessis suuremad karbonaatkristallid. CO₂-ga **rikastamine** muutis mördi struktuuri ja omavahelisi suhteid, mis põhjustas krohvi kapillaaraktiivsuse vähenemise.

Samas on Tarmo Koosapoe tulemustes avaldanud ka, et karboniseerumine katsekehade veeimavust ei mõjutanud, sealhulgas sorptsioonil on karboniseerunud katsekehade niiskusesisaldus isegi suurem kui mittekarboniseerunud katsekehadel. Need tulemused lähevad vastuollu käesoleva töö tulemustega.

Tarmo töö sorptsiooni graafikul on osaliselt näha ka sarnast käitumist nagu käesolevas uurimistöös, kus karboniseerunud katsekehade adsorptsiooni ja desorptsiooni niiskused on omavahel rohkem sarnased. Arvestades lisaks eelnevale Liisa Puustusmaa uurimistööd [52], kus mittetäielikult karboniseerunud katsekehad kogusid desorptsiooni ajal endiselt kaalu, võib eeldada, et käesoleva töö raames toimus CO₂-ga **rikastamata** katsekehadega kuivamise ajal osaline karboniseerumine, mis tingis desorptsioonil katsekehade väiksema kaalu kaotuse.

Arvestades käesoleva töö veeauru läbilaskvuse tulemusi, saab tuua paralleele sorptsiooniomaduste tulemustega. Tulemusi omavahel võrreldes on näha, et CO₂-ga **rikastatud** katsekehade niiskus on sorptsioonil väiksem, veeauruläbivus aga suurem, mis võib lisaks eelnevale viidata katsekehade struktuuri muutusele.

Tarmo töö veeauru läbilaskeomaduste katsel selget läbivat joont ei tekkinud. Peene fraktsiooniga karboniseeritud katsekehade veeauruläbivus oli suurem, kui peene fraktsiooniga katsekehade veeauruläbivus. Jämeda fraktsiooniga katsekehad käitusid vastupidiselt. Kuna käesoleva töö katsed on struktuurilt pigem võrreldavad peene fraktsiooniga, siis selle ulatuses on katsetulemused siiski sarnased.

Toetudes käesoleva töö teooriale, kus on mainitud võimalikkust, et liiga kiire karboniseerumine tekitab katsekeha pinnale kõva kihi, mis pärsib vee või veeauru imavust, peab käesoleva töö autor antud katsete puhul vähetõenäoliseks, kuna vastasel korral oleks CO₂-ga **rikastatud** katsekehade veeauruläbivus samuti väiksem.

Käesoleva töö autor leiab, et karboniseerumise mõju krohvide niiskustehnilistele omadustele on vähe uuritud, mistõttu on võrdlusuurimusi raske leida. Kuna uurimused ei ole alati andnud võrdväärseid tulemusi, võiks käesolevat uuringut jätkata ja uurida kasutatud katsekehade morfoloogiat, et arendada edasi käesoleva uurimistöo tulemusi.

Töös käsitletud krohvid on tavaliselt kasutusel krohvisüsteemi osana. Uurimistulemused kajastavad krohvisüsteemi ühe komponendi valitud omadusi (veeimavus, sorptsioon ja difusioonitakistustegur) ning viimased kaks omadust on määratud ühtede ja samade katsekehadega. Selline lähenemine annab ülevaate kolmest olulisest niiskustehnilisest komponendist kui tervikust.

Standardites ja toodete infolehtedes on esitatud enamasti difusioonitakistustegur ja veeimavuse näitajad. Terviklikuma pildi annavad ja edaspidi tuleb jätkata uuringuid krohvisüsteemide osas. Oluline on teada, kuidas käitub krohv koos kattega (värv või viimistluskrohv). Samuti on oluline valdkond krohvisüsteemi ja aluspinna (puit, kivimaterjal) koostoimimine.

KOKKUVÕTE

Käesolevas uurimistöös panustati ehitusmaterjalide tootearendusele. Vastavalt krohvide kasutuseesmärgile ja hoone niiskustehnilisele toimivusele, uuriti lubipõhiste soojusisolatsioonkrohvide niiskustehnilisi omadusi. Tulemuste põhjal selgus, et üksikute koostisosade ja nende koguste muutmine krohvides mõjutab nende niiskustehnilisi omadusi.

Kapillaarse veeimavuse koefitsiendi määramisel selgus, et:

- valge tsement vähendab krohvi veeimavust
- rohke silaani sisaldus vähendab krohvi veeimavust
- vähene silaani sisaldus vähendab vähesel määral krohvi veeimavust
- lubjapasta suurendab krohvi veeimavust
- silaan põhjustab veeimavuse langust katse varasemas etapis
- valge tsement põhjustab veeimavuse langust katse hilisemas etapis

Hügrokoopsete sorptsiooniomaduste määramisel selgus, et:

- valge tsement vähendab krohvi niiskumist ja kuivamist
- rohke silaani sisaldus vähendab krohvi niiskumist väga vähesel määral, kuivamist suuremal määral
- vähene silaani sisaldus vähendab krohvi niiskumist väga vähesel määral
- lubjapasta sisaldus suurendab krohvi niiskumist ja kuivamist

Veeauru läbilaskeomaduste määramisel selgus, et:

- valge tsement vähendab krohvi veeauruläbivust
- rohke silaani sisaldus vähendab krohvi veeauruläbivust
- vähene silaani sisaldus vähendab krohvi veeauruläbivust vähesemal määral
- lubjapasta sisaldus suurendab krohvi veeauruläbivust

Lisaks koostisosade mõjule selgus, et niiskustehnilisi omadusi mõjutab ka krohvide karboniseerumisprotsess, kus mängib olulist rolli lubisideaine käitumine ja süsihappegaasi mõju karboniseerumisprotsessile. Karboniseerumisprotsessi tulemusena ja selle mõju niiskustehniliste omaduste tulemustele selgus, et:

- suurem süsihappegaasi kontsentratsioon õhus kiirendab katsekehade karboniseerumist
- suurem süsihappegaasi kontsentratsioon õhus vähendab katsekehade veeimavust ja niiskumist, kuid suurendab veeauruläbivust

SUMMARY

This research focused on the development of building materials. According to the purpose of the plaster and the hygrothermal performance of the building, the properties of hygrothermal performance of the lime-based thermal insulation plasters were studied. The results found that changing the individual ingredients and their quantities in plaster affects their properties of hygrothermal performance.

In testing of water absorption coefficient due to capillary action was revealed that:

- white cement reduces plaster water absorption
- high concentration of silane reduces plaster water absorption
- low concentration of silane slightly reduces plaster water absorption
- lime paste increases the water absorption of plaster
- silane causes a decrease in water absorption at an earlier stage of the experiment
- white cement causes a decrease in water absorption at a later stage of the experiment

In testing of hygroscopic sorption properties was revealed that:

- white cement reduces plaster moisture and drying
- high concentration of silane reduces the moisture of the plaster very little, to a greater extent drying
- low concentration of silane slightly reduces plaster moisture
- lime paste increases plaster moisture and drying

In testing of water vapour transmission properties was revealed that:

- white cement reduces plaster water vapour permeability
- high concentration of silane reduces plaster water vapour permeability
- low concentration of silane slightly reduces plaster water vapour permeability
- lime paste increases plaster water vapour permeability

In addition to the influence of the ingredients, the properties of the hygrothermal performance were also affected by the process of carbonation of the plaster, where the behavior of lime-based binder and the effects of carbon dioxide on the carbonation process play an important role.

As a result of the carbonation process and its effect on the results of the properties of the hygrothermal performance was revealed that:

- higher concentrations of carbon dioxide in the air accelerate the carbonation of test pieces

- higher concentrations of carbon dioxide in the air reduce water absorption and irrigation of test pieces, but increase water vapor permeability

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. Posania, R. Veiga ja V. P. de Freitas, „Retrofitting Historic Walls: Feasibility of Thermal Insulation and Suitability of Thermal Mortars,“ *Heritage*, kd. 4, nr 3, pp. 2009-2022, 2021.
- [2] P. K. Amisshah, „INDOOR AIR QUALITY - COMBINING AIR HUMIDITY WITH CONSTRUCTION MOISTURE,“ University of Strathclyde, Glasgow, U.K., 2005.
- [3] K. Tooming, „Lubi I. Ajalugu, valmistamine ja kasutamine,“ Muinsuskaitseamet, Tallinn.
- [4] E. Reinsalu, „Mäemajandus,“ TTÜ mäeinstituut, Tallinn, 2008.
- [5] H. Viiding, Eesti mineraalid ja kivimid : [käsiraamat-määraja], Tallinn: Valgus, 1984.
- [6] K. Suuroja ja S. Suuroja, Kiviaabits : Eesti mineraalid, Tallinn: Geo Trail, 2007.
- [7] L.-M. Raado, Ehitusmaterjalid, Tallinn: SA Professor Karl Öigeri Stipendiumifond, 2018.
- [8] „KK501: MAAVARADE KAEVANDAMINE MAAKONNA JÄRGI (1992-2010),“ Eesti Statistikaamet, 2011. [Võrgumaterjal]. Available: https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud_tabelid__Keskond.%20Arhiiv__Loodusvarad%20ja%20nende%20kasutamine.%20Arhiiv/KK501. [Kasutatud 2022].
- [9] Keskkonnaministeerium, „eesti_maavarad_maardlate_levialad,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://envir.ee/ringmajandus/maapou>. [Kasutatud 2022].
- [10] P. Kaila, „Majatohter II osa,“ *Ehitaja raamatukogu*, pp. 3-116, 1999.
- [11] A. Raukas ja A. Teedumäe, „Geology and Mineral Resource of Estonia,“ 1997. [Võrgumaterjal]. Available: <https://geoloogia.info/geology/>. [Kasutatud 24 03 2022].
- [12] A. Raukas, Eesti. Loodus, Tallinn: Valgus; Eesti Entsüklopeediakirjastus, 1995.
- [13] D. Eleni, S. Thomas, S. Aurela ja V. Frederik, „Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars,“ %1 *9th International Masonry Conference at Guimaraes*, Portugal, 2014.
- [14] O. Cizer, K. V. Balen, J. Elsen ja D. V. Gemert, „CRYSTAL MORPHOLOGY OF PRECIPITATED CALCITE CRYSTALS FROM ACCELERATED CARBONATION OF LIME BINDERS,“ 2008. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/267820988_Crystal_morphology_of_precipitated_calcite_crystals_from_accelerated_carbonation_of_lime_binders. [Kasutatud aprill 2022].
- [15] R. Pere, Looduslikud ehitusmaterjalid. Seinad, põrandad, katus ja siseviimistlus, Tallinn: Ajakirjade Kirjastus, 2008.
- [16] M. Posania, R. Veiga ja V. P. d. Freitas, „Thermal mortar-based insulation solutions for historic walls: An extensive hygrothermal characterization of materials and systems,“ *Construction and Building Materials*, kd. 315, 2021.

- [17] J. Peterková, J. Zach ja M. Sedlmajer, „Development of advanced plasters for insulation and renovation of building constructions with regard to their hygrothermal behaviour,“ *Cement and Concrete Composites*, kd. 92, pp. 47-55, 2018.
- [18] D. Barnat-Hunek, M. K. Widomski, M. Szafraniec ja G. Łagód, „Impact of Different Binders on the Roughness, Adhesion Strength, and Other Properties of Mortars with Expanded Cork,“ *Materials*, kd. 11, nr 3, 2018.
- [19] D. Barnat-Hunek, R. Siddique ja G. Łagód, „Properties of hydrophobised lightweight mortars with expanded cork,“ *Construction and Building Materials*, kd. 155, pp. 15-25, 2017.
- [20] H. Pärnamägi, *Ehitusmaterjalid*, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2005.
- [21] J. Zagorskas, E. K. Zavadskas, Z. Turskis, M. Burinskiene, A. Blumberga ja D. Blumberga, „Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region,“ *Energy and Buildings*, kd. 78, pp. 35-42, 2014.
- [22] E. Fenoglio, S. Fantucci, V. Serra, C. Carbonaro ja R. Pollo, „Hygrothermal and environmental performance of a perlite-based insulating plaster for the energy retrofit of buildings,“ *Energy and Buildings*, kd. 179, pp. 26-38, 2018.
- [23] C. Saio, K. Nocentini, L. A. Tagliafico, P. H. Biwolé ja P. Achard, „Application of advanced insulating materials in historical buildings,“ *International Journal of Heat and Technology*, kd. 35, nr Special Issue 1, pp. S345-S352, 2017.
- [24] X. Hu, „Characteristics and Application of Thermal Mortar Materials in Building Materials,“ *Materials Today*, kd. 22, nr 4, pp. 2539-2543, 2019.
- [25] V. Ferrándiz-Mas, T. Bond, E. García-Alcocel ja C. R. Cheeseman, „Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash,“ *Construction and Building Materials*, kd. 61, pp. 285-292, 2014.
- [26] M. L. Torres ja P. A. García-Ruiz, „Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption,“ *Cement and Concrete Composites*, kd. 31, nr 2, pp. 114-119, 2009.
- [27] „Resthult Termokrohv & restaureerimistööd,“ Loomis OÜ, jaanuar 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://resthult.ee/lugemist/kiviseinte_soojustamine/. [Kasutatud mai 2022].
- [28] F. G. Branco ja L. Godinho, „On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission,“ *Construction and Building Materials*, kd. 45, pp. 184-191, 2013.
- [29] Soome Ehitusinseneride Liit RIL ry, *Ehitiste vee- ja niiskuskaitse juhend*, Tallinn: ET INFOkeskuse, 2015.
- [30] T. Masso, *EHITUSFÜÜSIKA ABC | soojus, niiskus, müra*, Tallinn: Ehitame, 2012.

- [31] „EVS-EN ISO 9346:2008 Hoonete ja ehitusmaterjalide soojus- ja niiskustehniline toimivus. Maasilevi füüsikalised suurused. Sõnastik,“ Eesti Standardikeskus, 2016.
- [32] J. Rohusaar, R. Mägi, T. Masso, I. Talvik ja V. Jaanisoo, Ehituskonstruktori käsiraamat, Tallinn: Ehitame, 2012.
- [33] „EVS-EN 15026:2007 Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Niiskuslevi hindamine numbrilise modelleerimisega,“ Eesti Standardikeskus, 2015.
- [34] „EVS-EN ISO 13788:2012,“ Eesti Standardikeskus, 2013.
- [35] I. Sims ja B. Brown, „16 - Concrete Aggregates,“ *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*, pp. 907-1015, 1998.
- [36] E. Uustalu, „Õhku sisseviivate lisandite kasutamine betooni püsivuse tõstmiseks,“ *Ehitaja*, kd. 11, nr 63, pp. 19-21, 2001.
- [37] I. Jang, D. Son, Y. Son, J. Min ja C. Yi, „Use of Methylcellulose-Based Pellet to Enhance the Bacterial Self-Healing of Cement Composite,“ *Materials*, kd. 14, nr 20, 2021.
- [38] X. Z. P. W. Chen Shi, „Influences of EVA and methylcellulose on mechanical properties of Portland cement-calcium aluminate cement-gypsum ternary repair mortar,“ *Construction and Building Materials*, kd. 241, 2020.
- [39] „White Cement,“ Portland Cement Association, Washington, 2019.
- [40] A. Talvari, „Ohtlikud ained,“ Sisekaitseakadeemia, Tallinn, 2006.
- [41] „EVS-EN 1015-3:2004+A2:2007 Müürimörtide katsemeetodid. Osa 3: Mõrdisegu konsistentsi määramine (raputuslaual) KONSOLIDEERITUD TEKST,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1015-3-2004%2Ba2-2007>. [Kasutatud 2022].
- [42] „EVS-EN 1015-18:2005,“ Eesti Standardikeskus, 2005.
- [43] „EVS-EN ISO 12571:2021 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties,“ Eesti Standardikeskus, 2021.
- [44] „Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method,“ Eesti Standardikeskus, 2016.
- [45] K. Jürmann, „LUBI KUI TRADITSIOONILINE EHITUSMATERJAL JA LUBIKROHVI ÕHUNIISKUST REGULEERIV TOIME,“ Tartu Ülikool, Tartu, 2005.
- [46] K. Kütt, „TERMOKROHVIL PÕHINEVA FASSAADISÜSTEEMI PÜSIVUSOMADUSED NING TOIMIVUS EESTILE OMASES KLIIMAS,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2017.
- [47] T. Koosapoeg, „KANEPIBETOOINI NIISKUSTEHNILISED OMADUSED: SORPTSIOON, VEEIMAVUS JA VEEAURULÄBIVUS,“ Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž, Tartu, 2022.

- [48] A. Izaguirre, A. Izaguirre ja 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.
- [49] H. Onton, „Investigation of the causes of deterioration of old reinforced concrete constructions and possibilities of their restoration,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2008.
- [50] M.-L. Teearu, „PABERKROHVI NIISKUSTEHNILISTE OMADUSTE MÄÄRAMINE: SORPTSIOON, VEEAURU LÄBILASKVUS NING NIISKUSPUHVERDUS-VÕIME,” Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž, Tartu, 2018.
- [51] H. Janssen ja S. Roels, „Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures,” *Energy and Buildings*, kd. 41, nr 4, pp. 382-394, 2009.
- [52] L. Puustusmaa, „MITTETÄIELIKULT KARBONISEERUNUD LUBIKROHVI NIISKUSTEHNILISTE OMADUSTE UURIMINE: PINNAKATETE MÕJU SORPTSIOONILE JA DESORPTSIOONILE NING VEEAURU LÄBILASKVUSELE,” Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž, Tartu, 2016.
- [53] S. Liuzzi, C. Rubino, P. Stefanizzi, A. Petrella, A. Boghetich, C. Casavola ja G. Pappalettera, „Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers,” *Construction and Building Materials*, kd. Volume 25, nr Issue 2, pp. 992-1000, 2011.
- [54] „EVS-EN 998-1:2016 Müürimörtide spetsifikatsioon Osa 1: Krohvimört,” Eesti Standardikeskus, 2016.

LISAD

Joonis L3.2.1 Tootja krohvide segamise juhend

Termokrohv on ette nähtud kasutamiseks nii sise- kui välitingimustes kasutades sundsegamist (seguvispel või horisontaalne segumasin). Segada mitte üle 4 min. Aluspinna ja ümbritseva õhu temperatuur peab olema vahemikus + 5 ° C ja + 28 ° C.

Soojusjuhtivus λ 0,072 W / mK
Tera suurus 0-2 mm
Tihedus u. 316 kg / m³ (Kuiv, pärast kõvenemist)
Nakketugevus 0,1 ± 0,01 N / mm²
Survetugevus 1 ± 0,2 N / mm²
Auruläbilaskvus 4,52 (EN1015-19:2016)
Tulekindlusklass A1 (vastavalt standardile EN 13501-1)
Materjalikulu 50L kott u 4,5m²/cm
Veekulu u 14-18L/50L segu kohta

Aluspinna ettevalmistus

Aluspind peab olema tugev, puhas ja tolmuvaba. Eemaldada pudenevad osad, lahtine värv ning soolad jne. Vajadusel pinnad eelnevalt karestada. Eriti poorsed pinnad (nagu tellis, roomatt, roopakk või põhupakk, jne.) eelnevalt kruntida/niisutada korralikult lubjapiimaga (1 osa lubja/10 osa vett) või kasutada termokrunti. Hoolimata poorsusest tuleks aluspindu niisutada. Kinni katta osad, mida ei krohvita, eriti metall, alumiinium ning puit.

Töö käik

Segumasinasse või segunõusse kallata 50L kuivsegu ning segada ilma veeta, kuni kuivained on segunenud (tänu täiteaine kergele kaalule võivad sideained transpordil kihistuda). Lisada u 15L vett ja segada, vajadusel lisada vett vähehaaval kuni soovitava segupaksuseni. Mitte segada kauem kui, u 4 minutit ja soovitatav aeglastel pööretel. Lasta segul paar minutit seista ja siis segada uuesti. Valmis segu on kasutatav u 3h.

Krohvipinna kuivamise aeg sõltub aluspinnast (poorsus, niiskus) ja keskkonnamõjudest (tuul, päike, temperatuur). Käsitsi võib krohvi peale kanda kuni 4cm korraga ja pritsiga kuni 8cm ning kogupaksuses kuni 20 cm. Uue kihiga võib peale kanda u 4-5h möödudes või hiljemalt järgmine päev. Eelnevad kihid karestada. Vahekihtide puhul soovitav kasutada puidust liipi. Lõplik kuivamine sõltuvalt paksusest ja keskkonna mõjudest vähemalt nädal aega.

Viimistlus

Krohvitud pinnad katta võimalusel peenviimistluskrohviga u 2-3mm kihiga. Vajadusel võib pindu värvida lubivärviga.

Tabel L3.2.1 Süsihappegaasi manustamine õhku karboniseerumisprotsessil

Süsihappegaasi manustamine õhku karboniseerumisprotsessi vältel	
15.02.2022	15 l/s - 1 min
16.02.2022	15 l/s - 1 min
17.02.2022	15 l/s - 1 min
18.02.2022	15 l/s - 1 min
19.02.2022	15 l/s - 1 min
21.02.2022	15 l/s - 1 min
22.02.2022	20 l/s - 2 min
23.02.2022	20 l/s - 2 min
25.02.2022	20 l/s - 2 min
26.02.2022	20 l/s - 2 min
27.02.2022	20 l/s - 2 min
28.02.2022	20 l/s - 2 min
01.03.2022	20 l/s - 2 min
02.03.2022	20 l/s - 2 min
03.03.2022	20 l/s - 2 min
04.03.2022	20 l/s - 2 min
05.03.2022	20 l/s - 2 min
06.03.2022	20 l/s - 2 min
07.03.2022	20 l/s - 2 min
08.03.2022	20 l/s - 2 min
09.03.2022	20 l/s - 2 min
10.03.2022	20 l/s - 2 min
11.03.2022	20 l/s - 2 min
12.03.2022	20 l/s - 2 min
13.03.2022	20 l/s - 2 min
14.03.2022	20 l/s - 2 min
15.03.2022	20 l/s - 3 min
	20 l/s - 3 min
16.03.2022	20 l/s - 4 min
	20 l/s - 4 min
17.03.2022	20 l/s - 3 min
18.03.2022	20 l/s - 3 min
	20 l/s - 3 min
20.03.2022	20 l/s - 3 min
	20 l/s - 5 min
22.03.2022	20 l/s - 5 min
23.03.2022	20 l/s - 7 min
25.03.2022	20 l/s - 7 min
26.03.2022	20 l/s - 7 min
30.03.2022	20 l/s - 10 min
31.03.2022	20 l/s - 6 min
01.04.2022	20 l/s - 10 min
02.04.2022	20 l/s - 10 min

Tabel L4.1.1 CO₂-ga rikastatud krohvide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed

				CO ₂ -ga rikastatud krohvide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed koos vormi ja alusega																
Tüüp	Katsekeha	Alus	Vorm	19.02.	21.02.	23.02.	25.02.	27.02.	01.03.	04.03.	06.03.	08.03.	10.03.	12.03.	14.03.	18.03.	22.03.	25.03.	29.03.	02.04.
Silinder	TK(CO ₂)-1	4,26	27	130,899	127,514	120,17	116,54	113,095	111,614	110,525	109,931	109,845	109,935	109,894	109,902	110,648	110,236	110,225	110,21	110,809
	TK(CO ₂)-2	4,255	27	129,926	128,309	118,953	114,48	110,322	108,453	107,014	106,274	106,049	106,087	106,001	105,955	106,384	106	105,982	105,944	106,515
	TK(CO ₂)-3	4,298	27	130,05	128,518	120,049	115,879	111,966	110,344	109,298	108,731	108,731	108,839	108,809	108,853	109,393	109,133	109,098	109,003	109,505
	TK(CO ₂)-4	4,277	27	120,943	118,758	110,662	106,732	103,099	101,713	100,959	100,521	100,719	100,895	100,926	101,041	101,822	101,715	101,672	101,584	102,092
	TP(CO ₂)-1	4,225	27	129,899	124,745	113,523	107,348	102,996	101,546	100,938	100,566	100,743	100,897	100,884	100,998	101,73	101,484	101,406	101,288	101,559
	TP(CO ₂)-2	4,299	27	129,926	126,497	114,284	107,721	102,796	100,973	100,214	99,832	100,071	100,199	100,18	100,286	100,857	100,626	100,554	100,423	100,725
	TP(CO ₂)-3	4,266	26	135,849	133,223	120,226	113,04	107,601	105,601	104,414	103,77	103,805	103,891	103,826	103,872	104,363	104,096	104,001	103,865	104,223
	TP(CO ₂)-4	4,273	27	131,998	129,543	118,832	111,274	105,928	104,016	102,962	102,417	102,607	102,719	102,69	102,808	103,374	103,13	103,032	102,891	103,29
	K1(CO ₂)-1	4,242	27	110,842	108,518	104,477	102,403	100,635	100,45	100,694	100,707	101,02	101,262	101,399	101,558	102,71	102,509	102,407	102,274	102,524
	K1(CO ₂)-2	4,287	27	121,887	101,4	98,605	97,205	95,98	95,965	96,27	96,325	96,668	96,89	97,028	97,194	97,9	97,794	97,722	97,584	97,815
	K1(CO ₂)-3	4,3	27	105,556	102,509	99,39	97,748	96,236	96,233	96,76	96,802	97,173	97,399	97,539	97,703	98,25	98,1	98,01	97,879	98,098
	K1(CO ₂)-4	4,26	27	111,795	109,766	106,703	105,239	103,925	103,913	104,219	104,275	104,68	104,914	105,07	105,259	106,052	105,954	105,852	105,704	105,981
	K2(CO ₂)-1	4,231	27	125,83	123,01	114,774	110,863	107,258	105,779	104,971	104,547	104,676	104,785	104,811	104,914	105,835	105,62	105,586	105,49	105,985
	K2(CO ₂)-2	4,312	27	128,758	126,99	118,086	113,998	110,153	108,521	107,434	106,829	106,808	106,875	106,871	106,903	107,455	107,263	107,217	107,133	107,701
	K2(CO ₂)-3	4,295	27	129,87	128,26	118,694	114,211	110,282	108,727	107,838	107,389	107,534	107,639	107,68	107,775	108,462	108,351	108,32	108,216	108,719
	K2(CO ₂)-4	4,268	27	129,222	127,162	118,196	114	110,166	108,682	107,845	107,423	107,621	107,745	107,803	107,908	108,642	108,588	108,532	108,423	108,967
K3(CO ₂)-1	4,274	27	119,042	108,91	105,457	103,444	101,125	100,484	100,476	100,31	100,564	100,771	100,771	100,942	101,767	101,59	101,496	101,278	101,579	
K3(CO ₂)-2	4,202	27	126,38	115,008	111,114	108,871	106,315	105,513	105,366	105,136	105,375	105,575	105,549	105,714	106,089	105,947	105,851	105,623	105,92	
K3(CO ₂)-3	4,242	27	118,717	108,548	105,438	103,711	101,788	101,48	101,734	101,729	102,053	102,26	102,275	102,46	102,83	102,713	102,645	102,423	102,706	
K3(CO ₂)-4	4,216	27	121,3	109,178	106,027	104,242	102,119	101,577	101,601	101,448	101,74	101,938	101,926	102,098	102,495	102,382	102,277	102,126	102,506	
Risttahukas	TK(CO ₂)-1	4,832	0	141,249	123,704	106,386	96,5	91,497	90,473	90,948	90,983	91,524	91,899	92,11	92,43	93,093	93,032	92,95	92,845	93,149
	TK(CO ₂)-2	4,607	0	145,55	138,461	121,463	106,703	97,331	94,035	91,31	90,696	90,934	91,285	91,341	91,644	92,268	92,208	92,126	91,984	92,386
	TK(CO ₂)-3	4,128	0	149,082	130,011	116,924	107,434	100,371	97,413	95,638	94,829	94,779	95,044	95,012	95,224	95,875	95,876	95,824	95,702	96,18
	TP(CO ₂)-1	1,923	0	132,039	112,344	94,835	88,863	83,58	82,861	83,167	83,18	83,664	83,897	83,984	84,268	85,115	84,991	84,914	84,819	85,041
	TP(CO ₂)-2	1,797	0	136,195	116,107	99,879	87,43	82,645	81,498	81,463	81,269	81,674	82,002	81,926	82,215	82,667	82,54	82,454	82,337	82,599
	TP(CO ₂)-3	2,249	0	134,898	114,31	99,137	90,557	84,31	83,054	82,831	82,637	82,995	83,253	83,265	83,564	84,129	84,051	83,976	83,879	84,109
	K1(CO ₂)-1	1,819	0	123,786	108,486	92,154	87,025	83,065	82,237	82,357	82,283	82,61	82,904	82,932	83,141	83,776	83,621	83,508	83,361	83,55
	K1(CO ₂)-2	2,051	0	121,909	97,853	92,58	88,932	86,148	85,593	85,849	85,787	86,11	86,424	86,419	86,626	86,8	86,642	86,534	86,374	86,602
	K1(CO ₂)-3	2,441	0	129,787	118,783	103,367	94,607	89,098	86,865	85,477	84,849	84,848	85,095	85,021	85,189	85,314	85,224	85,108	84,932	85,181
	K2(CO ₂)-1	3,544	0	140,4	135,652	121,6	108,824	99,842	96,121	92,791	91,337	90,309	89,922	89,281	88,854	88,735	88,19	88,068	87,895	88,351
	K2(CO ₂)-2	2,85	0	152,945	141,954	129,671	117,191	108,708	104,567	101,138	99,325	98,036	97,49	96,604	96,029	95,177	94,763	94,65	94,452	94,994
	K2(CO ₂)-3	2,49	0	145,579	131,125	119,912	109,394	99,682	95,558	92,423	90,935	90,185	90,025	89,71	89,641	90,023	89,94	89,886	89,727	90,231
	K3(CO ₂)-1	5,272	0	153,596	143,652	127,58	112,011	102,028	98,261	96,184	95,597	95,838	96,044	96,032	96,241	96,744	96,582	96,458	96,208	96,534
K3(CO ₂)-2	4,804	0	157,16	148,898	123,72	109,388	100,936	98,072	97,004	96,81	97,128	97,37	97,475	97,713	98,159	98,013	97,926	97,634	97,968	
K3(CO ₂)-3	4,616	0	166,74	152,293	131,194	115,451	106,894	103,903	102,333	101,923	102,263	102,47	102,553	102,82	103,336	103,207	103,097	102,807	103,155	

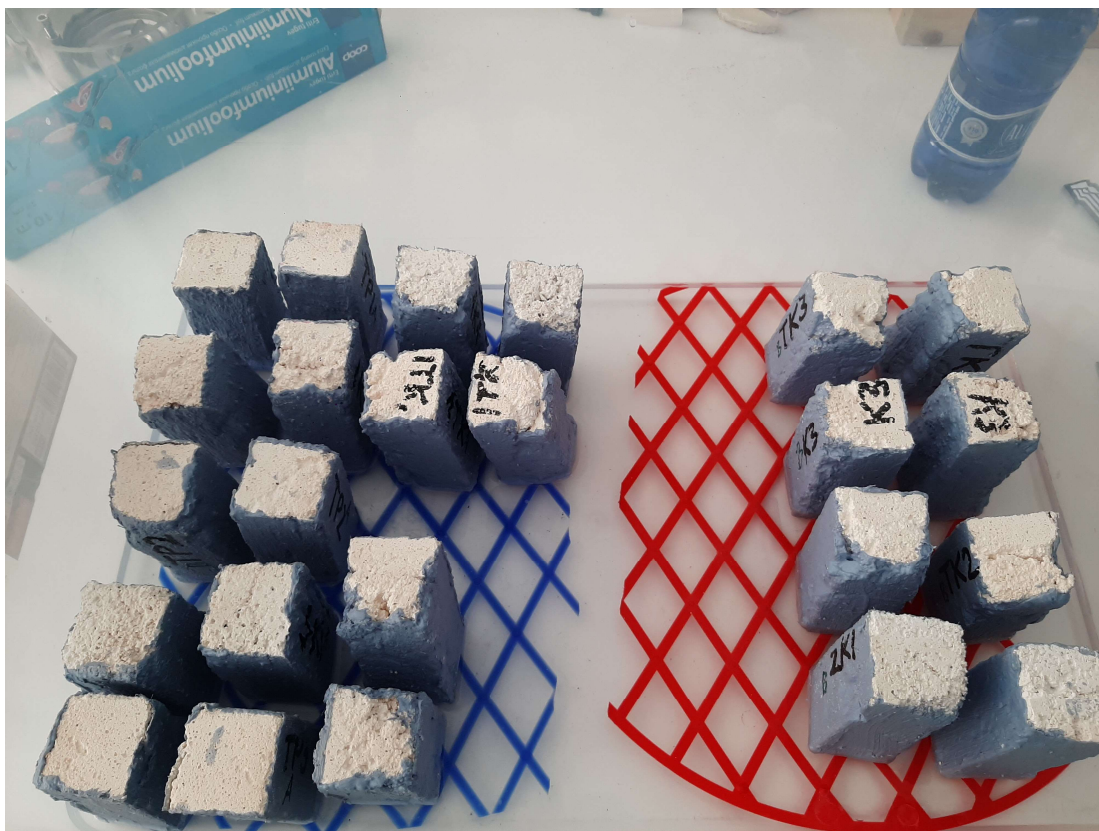
Tabel L4.1.2 CO₂-ga rikastamata krohvide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastamata krohvide karboniseerumisprotsessi kaaluandmed koos vormi ja alusega																				
Tüüp	Katsekeha	Alus	Vorm	19.02.	21.02.	23.02.	25.02.	27.02.	01.03.	04.03.	06.03.	08.03.	10.03.	12.03.	14.03.	18.03.	22.03.	25.03.	29.03.	02.04.
				Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal
Silinder	TK1	7,504	27	131,834	130,317	121,793	119,209	116,052	114,654	113,306	112,521	111,995	111,432	111,023	111,043	111,043	110,747	110,938	111,029	111,128
	TK2	3,834	27	128,882	127,682	119,006	116,134	112,7	111,264	109,644	108,733	108,016	107,24	106,546	106,396	105,355	104,946	105,099	105,134	105,201
	TK3	7,746	27	138,422	137,195	128,549	125,457	121,697	119,998	118,243	117,247	116,372	115,453	114,671	114,47	113,563	113,112	113,274	113,304	113,367
	TK4	7,66	27	141,271	140,024	130,696	126,201	121,604	119,458	117,412	116,155	115,162	114,052	113,219	112,958	112,067	111,651	111,822	111,883	111,973
	TP1	7,37	27	130,798	128,511	117,639	112,983	108,649	106,955	105,497	104,735	104,298	103,775	103,457	103,503	103,463	103,249	103,45	103,539	103,652
	TP2	7,005	27	131,758	130,309	120,463	115,268	110,099	108,103	106,211	105,257	104,649	104,019	103,594	103,621	103,399	103,195	103,417	103,507	103,621
	TP3	6,66	26	133,057	131,67	122,125	116,822	111,281	109,142	107,24	106,288	105,593	104,873	104,422	104,4	104,055	103,83	104,017	104,065	104,161
	TP4	8,105	27	136,731	135,381	126,148	120,682	114,967	112,676	110,586	109,444	108,703	107,927	107,475	107,463	107,26	107,056	107,289	107,375	107,502
	K1-1	4,257	27	114,993	113,585	108,762	107,457	105,714	105,372	105,346	105,307	105,37	105,35	105,346	105,524	106,34	106,355	106,619	106,865	107,047
	K1-2	4,218	27	117,943	116,592	110,79	109,04	106,787	106,112	105,743	105,593	105,574	105,529	105,499	105,665	105,98	106,085	106,381	106,672	106,879
	K1-3	4,213	27	119,471	118,23	113,107	111,519	109,352	108,783	108,523	108,377	108,391	108,332	108,298	108,452	108,759	108,845	109,132	109,425	109,638
	K1-4	4,223	27	116,33	114,98	108,373	106,456	103,993	103,213	102,719	102,47	102,434	102,329	102,267	102,401	102,669	102,726	103,001	103,274	103,475
	K2-1	8,262	27	139,642	132,342	123,229	120,687	117,208	115,79	114,559	113,715	113,176	112,517	112,072	111,958	112,102	111,765	111,975	112,044	112,145
	K2-2	7,741	27	144,506	138,349	128,78	125,731	121,867	120,27	118,825	117,849	117,149	116,293	115,651	115,411	114,76	114,561	114,784	114,853	114,989
	K2-3	4,551	27	136,501	131,016	123,725	121,634	118,417	117,158	116,004	115,188	114,57	113,699	113,073	112,913	112,301	112,077	112,305	112,367	112,506
	K2-4	6,551	27	130,214	123,462	115,644	113,206	109,751	108,444	107,292	106,535	106,075	105,491	105,168	105,181	105,143	105,115	105,386	105,532	105,717
	K3-1	3,492	27	132,03	127,925	122,377	120,762	118,12	116,904	115,713	114,897	114,278	113,449	112,766	112,559	112,4	111,724	111,77	111,807	111,838
	K3-2	3,463	27	132,171	129,312	121,782	119,491	116,585	115,25	113,821	112,928	112,213	111,385	110,72	110,502	109,604	109,21	109,328	109,374	109,435
	K3-3	7,064	27	139,107	137,102	130,731	128,841	125,875	124,553	123,177	122,296	121,711	120,968	120,325	120,095	119,146	118,678	118,793	118,8	118,853
	K3-4	4,087	27	133,649	131,34	124,166	121,939	118,856	117,508	116,144	115,177	114,488	113,673	113,057	112,88	112,244	111,924	112,077	112,129	112,226
Risttahukas	TK1	6,004	0	147,572	143,086	132,042	123,558	112,289	107,684	103,27	100,81	98,94	97,024	95,853	95,283	94,458	94,004	94,235	94,287	94,381
	TK2	2,871	0	145,254	140,908	126,022	116,838	106,475	102,279	98,495	96,578	94,927	93,349	92,296	91,718	90,777	90,479	90,727	90,796	90,893
	TK3	3,036	0	150,019	145,019	129,327	120,52	110,083	106,105	102,366	100,189	98,444	96,61	95,386	94,843	93,818	93,483	93,712	93,733	93,791
	TP1	8,484	0	161,651	153,113	128,387	111,995	99,607	96,914	95,564	95,066	95,023	94,874	94,848	95,044	95,451	95,404	95,659	95,706	95,723
	TP2	8,012	0	158,704	149,899	126,106	112,565	98,538	94,299	92,095	91,453	91,366	91,188	91,172	91,36	91,706	91,645	91,885	91,91	91,921
	TP3	7,314	0	160,559	154,248	130,443	115,778	100,32	96,179	93,441	92,447	92,209	91,924	91,888	92,041	92,472	92,419	92,695	92,75	92,783
	K1-1	7,528	0	163,032	159,869	148,481	139,483	125,482	115,243	107,031	103,384	100,864	98,658	97,325	96,777	96,438	96,175	96,346	96,416	96,502
	K1-2	7,869	0	167,57	159,24	145,406	137,4	124,318	117,52	111,848	108,702	106,645	104,612	103,4	102,851	102,186	101,959	102,167	102,279	102,336
	K1-3	6,639	0	153,431	148,198	137,333	130,486	118,997	112,97	107,131	104,195	102,236	100,394	99,299	98,773	98,033	97,797	97,998	98,101	98,13
	K2-1	4,211	0	153,621	145,247	130,218	122,647	114,144	110,838	107,309	105,44	104,017	102,467	101,427	100,915	100,097	99,439	99,587	99,586	99,668
	K2-2	6,576	0	150,476	147,629	129,361	121,782	113,677	110,315	107,393	105,56	104,222	102,783	101,815	101,436	100,585	100,304	100,542	100,646	100,712
	K3-1	4,386	0	149,534	138,297	124,465	117,804	111,592	108,602	105,272	103,587	102,156	100,624	99,466	98,997	98,027	97,454	97,584	97,58	97,564

Joonis L3.3.1 Katsekehad kuivatuskapis enne veemavuse katset



Joonis L3.3.2 Katsekehad vees veimavuskatsel



Joonis L3.3.3 Katsekehad kliimakambris sorptsiooni katsel



Joonis L3.3.4 Katsekehad kliimakambris veeauruläbivuse katsel



Tabel L4.2.1 CO₂-ga rikastatud krohvide veeimavuse kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastatud krohvide veeimavuse kaaluandmed							
	Krohv	Katsekeha	Kaal enne katset	Kaal 10 min	Kaal 90 min	Kaal 6 h	Kaal 24 h
Risttahukas	TK(CO ₂)-1	A	52,241	65,339	82,858	88,382	94,231
		B	54,613	67,179	85,358	91,374	97,327
	TK(CO ₂)-2	A	53,35	66,293	83,555	89,992	96,47
		B	53,502	66,347	84,044	89,318	95,232
	TK(CO ₂)-3	A	52,019	65,007	80,562	86,763	93,077
		B	59,559	72,913	90,282	98,825	106,255
	TP(CO ₂)-1	A	50,14	60,931	76,885	86,082	93,118
		B	48,917	59,321	74,242	83,768	90,956
	TP(CO ₂)-2	A	51,337	63,66	79,015	86,875	93,479
		B	49,49	61,97	77,117	84,599	90,827
	TP(CO ₂)-3	A	50,988	62,922	77,341	86,764	94,078
		B	49,516	60,971	75,844	84,564	91,64
	K1(CO ₂)-1	A	53,89	63,108	72,951	79,124	81,619
		B	55,014	63,004	72,8	79,818	82,264
	K1(CO ₂)-2	A	52,981	62,797	73,456	78,352	80,414
		B	57,904	67,758	78,371	84,065	86,631
	K1(CO ₂)-3	A	55,672	66,778	77,317	82,909	85,445
		B	53,328	63,707	74,1	80,326	82,887
	K2(CO ₂)-1	A	53,88	64,818	77,198	85,816	93,291
		B	55,227	64,867	77,595	87,917	94,671
	K2(CO ₂)-2	A	57,973	68,593	79,901	90,897	100,315
		B	56,164	65,47	76,13	87,182	96,949
	K2(CO ₂)-3	A	55,317	64,208	74,219	84,262	93,025
		B	55,969	64,686	75,237	85,081	94,078
K3(CO ₂)-1	A	54,803	58,395	62,31	68,41	75,008	
	B	57,966	61,916	65,835	72,494	80,038	
K3(CO ₂)-2	A	60,749	64,691	69,122	76,276	83,974	
	B	54,998	58,559	62,795	69,324	76,132	
K3(CO ₂)-3	A	60,669	64,911	69,284	76,638	83,946	
	B	57,972	61,972	66,375	73,59	80,801	

Tabel L4.2.2 CO₂-ga rikastamata krohvide veemavuse kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastamata krohvide veemavuse kaaluandmed							
Risttahukas	Krohv	Katsekeha	Kaal enne katset	Kaal 10 min	Kaal 90 min	Kaal 6 h	Kaal 24 h
	TK-1	A		56,793	68,249	88,618	95,558
B			52,68	64,724	84,096	88,984	94,536
TK-2	A		54,7	65,947	85,453	92,669	98,992
	B		53,858	64,942	84,709	91,087	97,109
TK-3	A		56,327	67,45	86,282	96,081	102,88
	B		51,038	62,475	80,215	88,025	94,033
TP-1	A		52,62	67,01	88,07	93,427	98,433
	B		51,623	64,722	84,863	91,082	96,577
TP-2	A		52,152	64,896	85,84	92,138	97,852
	B		52,828	65,355	85,718	91,715	97,772
TP-3	A		50,903	63,082	83,248	89,933	95,399
	B		53,889	66,583	89,079	94,363	99,484
K1-1	A		56,934	66,212	77,469	84,333	87,243
	B		53,482	63,875	75,274	81,064	83,81
K1-2	A		56,659	66,481	80,084	85,405	88,36
	B		56,936	67,956	77,694	84,273	87,305
K1-3	A		54,629	64,749	75,859	81,462	84,403
	B		54,323	65,379	77,828	83,456	86,298
K2-1	A		56,594	67,633	85,317	93,367	99,471
	B		60,595	71,621	89,92	100,143	107,136
K2-2	A		57,958	68,075	82,36	94,567	103,38
	B		54,978	64,476	77,868	88,712	97,384
K3-1	A		55,86	61,024	68,791	76,059	84,633
	B		57,028	62,101	69,687	76,954	85,125

Tabel L4.3.1 CO₂-ga rikastatud krohvide adsorptsiooni kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastatud krohvide adsorptsiooni kaaluandmed koos vormi ja alusega																	
				07.04. kuivatus	09.04. RH 30%	10.04. RH 30%	11.04. RH 50%	12.04. RH 50%	13.04. RH 50%	14.04. RH 75%	15.04. RH 75%	16.04. RH 75%	17.04. RH 75%	19.04. RH 95%	20.04. RH 95%	21.04. RH 95%	22.04. RH 95%
Tüüp	Katsekeha	Alus	Vorm	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal
Silinder	TK(CO ₂)-1	4,26	27	109,937	110,229	110,25	110,525	110,542	110,554	111,11	111,184	111,23	111,227	112,974	113,185	113,342	113,433
	TK(CO ₂)-2	4,255	27	105,52	105,807	105,817	106,092	106,105	106,113	106,686	106,766	106,815	106,805	108,541	108,745	108,906	108,995
	TK(CO ₂)-3	4,298	27	108,584	108,833	108,842	109,096	109,118	109,113	109,658	109,756	109,807	109,796	111,47	111,655	111,787	111,866
	TK(CO ₂)-4	4,277	27	101,202	101,461	101,464	101,711	101,719	101,719	102,236	102,297	102,355	102,334	103,975	104,195	104,257	104,325
	TP(CO ₂)-1	4,225	27	100,853	101,115	101,121	101,156	101,156	101,157	101,635	101,666	101,703	101,646	103,536	103,684	103,77	103,822
	TP(CO ₂)-2	4,299	27	99,974	100,22	100,231	100,454	100,456	100,446	100,899	100,922	100,96	100,896	102,731	102,809	102,886	102,966
	TP(CO ₂)-3	4,266	26	103,356	103,625	103,632	103,884	103,885	103,874	104,404	104,441	104,478	104,408	106,44	106,639	106,715	106,759
	TP(CO ₂)-4	4,273	27	102,441	102,716	102,713	102,952	102,954	102,944	103,475	103,495	103,563	103,481	105,704	105,921	105,88	105,969
	K1(CO ₂)-1	4,242	27	102,066	102,307	102,327	102,526	102,565	102,57	102,957	103,008	103,06	103,109	105,297	105,51	105,701	105,796
	K1(CO ₂)-2	4,287	27	97,241	97,397	97,388	97,554	97,557	97,547	97,888	97,925	97,95	97,984	99,094	99,191	99,334	99,418
	K1(CO ₂)-3	4,3	27	97,522	97,688	97,685	97,833	97,845	97,845	98,174	98,193	98,226	98,256	99,434	99,554	99,636	99,768
	K1(CO ₂)-4	4,26	27	105,36	105,539	105,542	105,702	105,717	105,711	106,054	106,097	106,14	106,177	107,531	107,688	107,829	107,918
	K2(CO ₂)-1	4,231	27	105,21	105,462	105,474	105,709	105,746	105,754	106,245	106,305	106,35	106,375	107,788	107,924	108,013	108,067
	K2(CO ₂)-2	4,312	27	106,796	107,062	107,077	107,357	107,38	107,39	107,986	108,06	108,12	108,14	110,027	110,185	110,282	110,32
	K2(CO ₂)-3	4,295	27	107,827	108,073	108,081	108,326	108,352	108,361	108,879	108,953	109,008	109,026	110,593	110,748	110,727	110,787
	K2(CO ₂)-4	4,268	27	108,06	108,312	108,315	108,574	108,584	108,597	109,144	109,194	109,239	109,262	110,814	111,018	111,07	111,135
	K3(CO ₂)-1	4,274	27	100,89	101,127	101,15	101,371	101,402	101,404	101,862	101,924	101,983	102,019	103,337	103,49	103,63	103,726
	K3(CO ₂)-2	4,202	27	105,066	105,302	105,318	105,559	105,581	105,591	106,123	106,209	106,26	106,299	107,775	107,97	108,15	108,263
	K3(CO ₂)-3	4,242	27	101,979	102,18	102,184	102,389	102,403	102,417	102,879	102,966	103,01	103,05	104,386	104,588	104,719	104,848
	K3(CO ₂)-4	4,216	27	101,68	101,914	101,917	102,159	102,166	102,177	102,687	102,771	102,819	102,857	104,365	104,608	104,707	104,858

Tabel L4.3.2 CO₂-ga rikastamata krohvide adsorptsiooni kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastamata krohvide adsorptsiooni kaaluandmed koos vormi ja alusega																	
				07.04. kuivatus	09.04. RH 30%	10.04. RH 30%	11.04. RH 50%	12.04. RH 50%	13.04. RH 50%	14.04. RH 75%	15.04. RH 75%	16.04. RH 75%	17.04. RH 75%	19.04. RH 95%	20.04. RH 95%	21.04. RH 95%	22.04. RH 95%
Tüüp	Katsekeha	Alus	Vorm	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal
Silinder	TK1	7,504	27	109,724	110,105	110,123	110,452	110,511	110,556	111,184	111,286	111,359	111,378	112,979	113,278	113,455	113,587
	TK2	3,834	27	103,202	103,619	103,645	104,037	104,102	104,167	104,98	105,087	105,203	105,297	107,694	108,015	108,223	108,37
	TK3	7,746	27	111,333	111,791	111,818	112,252	112,314	112,394	113,255	113,378	113,497	113,587	116,401	116,784	117,05	117,265
	TK4	7,66	27	110,181	110,624	110,649	111,052	111,114	111,179	111,999	112,112	112,228	112,323	115,032	115,28	115,442	115,563
	TP1	7,37	27	102,653	103,003	103,012	103,265	103,282	103,285	103,823	103,88	103,945	103,979	106,052	106,2	106,283	106,356
	TP2	7,005	27	102,555	102,888	102,89	103,163	103,175	103,174	103,735	103,8	103,863	103,902	105,928	106,062	106,142	106,22
	TP3	6,66	26	103,045	103,393	103,397	103,672	103,687	103,719	104,309	104,357	104,435	104,478	106,966	107,116	107,142	107,186
	TP4	8,105	27	106,423	106,769	106,79	107,073	107,098	107,107	107,693	107,764	107,836	107,887	110,159	110,293	110,395	110,443
	K1-1	4,257	27	105,941	106,247	106,28	106,571	106,628	106,648	107,181	107,252	107,302	107,362	108,613	108,805	108,925	109,039
	K1-2	4,218	27	105,63	105,902	105,904	106,16	106,188	106,187	106,723	106,774	106,837	106,882	108,373	108,6	108,785	108,924
	K1-3	4,213	27	108,405	108,645	108,655	108,905	108,934	108,932	109,43	109,509	109,56	109,604	110,896	111,1	111,28	111,393
	K1-4	4,223	27	102,295	102,541	102,549	102,794	102,811	102,811	103,29	103,351	103,39	103,442	104,711	104,888	105,07	105,177
	K2-1	8,262	27	110,767	111,178	111,2	111,559	111,62	111,685	112,389	112,487	112,603	112,7	115,005	115,223	115,351	115,444
	K2-2	7,741	27	113,408	113,82	113,836	114,226	114,28	114,314	115,098	115,2	115,328	115,42	118,06	118,261	118,352	118,436
	K2-3	4,551	27	110,835	111,238	111,26	111,637	111,682	111,736	112,512	112,622	112,764	112,853	115,286	115,577	115,707	115,808
	K2-4	6,551	27	104,532	104,871	104,892	105,198	105,23	105,275	105,912	105,997	106,095	106,166	108,143	108,335	108,446	108,515
	K3-1	3,492	27	110,312	110,747	110,779	111,129	111,173	111,215	111,844	111,955	112,023	112,043	113,691	113,937	114,155	114,413
	K3-2	3,463	27	107,821	108,194	108,213	108,541	108,573	108,575	109,301	109,402	109,53	109,595	111,523	111,777	111,941	112,083
	K3-3	7,064	27	117,07	117,476	117,496	117,864	117,908	117,926	118,705	118,833	118,926	119,015	121,097	121,419	121,662	121,85
	K3-4	4,087	27	110,626	111,023	111,035	111,386	111,409	111,43	112,158	112,273	112,362	112,434	114,494	114,808	115,055	115,233

Tabel L4.3.3 CO₂-ga rikastatud krohvide desorptsiooni kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastatud krohvide desorptsiooni kaaluandmed koos vormi ja alusega												
				07.04. kuivatuskapis	29.04. RH 30%	28.04. RH 30%	27.04. RH 50%	26.04. RH 50%	25.04. RH 75%	24.04. RH 75%	23.04. RH 75%	22.04. RH 95%
Tüüp	Katsekeha	Alus	Vorm	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal
Silinder	TK(CO ₂)-1	4,26	27	109,937	110,576	110,607	110,957	111,008	111,663	111,666	111,992	113,433
	TK(CO ₂)-2	4,255	27	105,52	106,048	106,079	106,438	106,493	107,16	107,162	107,519	108,995
	TK(CO ₂)-3	4,298	27	108,584	109,131	109,163	109,502	109,558	110,175	110,182	110,482	111,866
	TK(CO ₂)-4	4,277	27	101,202	101,715	101,737	102,064	102,118	102,698	102,701	102,947	104,325
	TP(CO ₂)-1	4,225	27	100,853	101,365	101,381	101,71	101,746	102,219	102,192	102,333	103,822
	TP(CO ₂)-2	4,299	27	99,974	100,679	100,692	101,011	101,053	101,498	101,44	101,609	102,966
	TP(CO ₂)-3	4,266	26	103,356	104,108	104,124	104,488	104,533	105,058	105,011	105,168	106,759
	TP(CO ₂)-4	4,273	27	102,441	103,213	103,228	103,577	103,62	104,124	104,1	104,244	105,969
	K1(CO ₂)-1	4,242	27	102,066	103,46	103,474	103,75	103,769	104,06	104,005	104,097	105,796
	K1(CO ₂)-2	4,287	27	97,241	98,327	98,339	98,584	98,591	98,78	98,726	98,762	99,418
	K1(CO ₂)-3	4,3	27	97,522	98,61	98,626	98,865	98,87	99,07	99,008	99,048	99,768
	K1(CO ₂)-4	4,26	27	105,36	106,553	106,564	106,831	106,835	107,053	106,994	107,027	107,918
	K2(CO ₂)-1	4,231	27	105,21	105,868	105,887	106,195	106,233	106,731	106,714	106,918	108,067
	K2(CO ₂)-2	4,312	27	106,796	107,593	107,607	107,979	108,009	108,656	108,655	108,885	110,32
	K2(CO ₂)-3	4,295	27	107,827	108,47	108,5	108,83	108,869	109,412	109,4	109,601	110,787
	K2(CO ₂)-4	4,268	27	108,06	108,705	108,725	109,062	109,104	109,657	109,639	109,87	111,135
	K3(CO ₂)-1	4,274	27	100,89	102,05	102,066	102,337	102,332	102,701	102,658	102,766	103,726
	K3(CO ₂)-2	4,202	27	105,066	106,344	106,367	106,701	106,718	107,165	107,117	107,25	108,263
	K3(CO ₂)-3	4,242	27	101,979	103,206	103,231	103,511	103,521	103,882	103,839	103,93	104,848
K3(CO ₂)-4	4,216	27	101,68	102,973	103,002	103,322	103,34	103,775	103,73	103,846	104,858	

Tabel L4.3.4 CO₂-ga rikastamata krohvide desorptsiooni kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastamata krohvide desorptsiooni kaaluandmed koos vormi ja alusega												
				07.04. kuivatuskapis	29.04. RH 30%	28.04. RH 30%	27.04. RH 50%	26.04. RH 50%	25.04. RH 75%	24.04. RH 75%	23.04. RH 75%	22.04. RH 95%
Tüüp	Katsekeha	Alus	Vorm	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal
Silinder	TK1	7,504	27	109,724	111,033	111,073	111,451	111,507	112,117	112,100	112,363	113,587
	TK2	3,834	27	103,202	104,857	104,897	105,343	105,393	106,165	106,148	106,421	108,37
	TK3	7,746	27	111,333	113,133	113,177	113,649	113,705	114,598	114,59	114,962	117,265
	TK4	7,66	27	110,181	111,959	111,99	112,438	112,485	113,214	113,182	113,418	115,563
	TP1	7,37	27	102,653	103,685	103,71	104,057	104,096	104,6	104,574	104,721	106,356
	TP2	7,005	27	102,555	103,597	103,615	103,964	104,006	104,505	104,477	104,627	106,22
	TP3	6,66	26	103,045	104,179	104,207	104,556	104,606	105,129	105,104	105,25	107,186
	TP4	8,105	27	106,423	107,656	107,679	108,032	108,075	108,587	108,562	108,711	110,443
	K1-1	4,257	27	105,941	107,490	107,567	107,955	107,986	108,312	108,262	108,321	109,039
	K1-2	4,218	27	105,63	107,234	107,305	107,69	107,722	108,062	108,013	108,089	108,924
	K1-3	4,213	27	108,405	109,951	110,018	110,405	110,429	110,736	110,668	110,712	111,393
	K1-4	4,223	27	102,295	103,725	103,785	104,153	104,167	104,473	104,414	104,472	105,177
	K2-1	8,262	27	110,767	112,442	112,467	112,844	112,889	113,518	113,492	113,689	115,444
	K2-2	7,741	27	113,408	115,168	115,192	115,613	115,66	116,344	116,326	116,556	118,436
	K2-3	4,551	27	110,835	112,688	112,713	113,14	113,199	113,888	113,883	114,09	115,808
	K2-4	6,551	27	104,532	105,746	105,77	106,111	106,151	106,71	106,693	106,903	108,515
	K3-1	3,492	27	110,312	111,924	111,996	112,4	112,47	113,037	113,02	113,239	114,413
	K3-2	3,463	27	107,821	109,675	109,702	110,115	110,151	110,7	110,653	110,782	112,083
	K3-3	7,064	27	117,07	119,085	119,131	119,593	119,642	120,332	120,304	120,484	121,85
	K3-4	4,087	27	110,626	112,371	112,408	112,821	112,873	113,512	113,492	113,687	115,233

Tabel L4.4.1 CO₂-ga rikastatud krohvide veeauruläbivuse kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastatud krohvide veeauruläbivuse kaaluandmed koos vormiga								
		05.05. kuivkaal	07.05. RH 50%	08.05. RH 50%	09.05. RH 50%	10.05. RH 50%	11.05. RH 50%	12.05. RH 50%
Tüüp	Katsekeha	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal
Silinder	TK(CO2)-1	686,53	684,412	683,128	681,707	680,246	678,95	677,645
	TK(CO2)-2	669,608	667,454	666,167	664,995	663,73	662,488	660,925
	TK(CO2)-3	690,915	688,553	686,995	685,751	684,233	682,816	680,922
	TK(CO2)-4	672,156	669,777	668,292	667,026	665,654	664,241	662,733
	TP(CO2)-1	681,636	678,951	677,397	676,087	674,637	673,141	671,403
	TP(CO2)-2	677,455	674,766	673,268	671,908	670,398	668,573	666,745
	TP(CO2)-3	684,44	681,932	680,516	678,884	677,129	675,574	673,788
	TP(CO2)-4	670,285	667,785	666,228	664,767	662,852	661,146	659,484
	K1(CO2)-1	682,6	679,105	677,878	675,981	674,708	673,368	671,159
	K1(CO2)-2	677,921	675,722	674,135	672,944	671,543	670,257	669,055
	K1(CO2)-3	675,574	673,417	672,092	671,018	669,78	668,515	667,182
	K1(CO2)-4	681,35	679,326	678,093	676,987	675,783	674,572	673,421
	K2(CO2)-1	687,903	685,757	684,529	683,388	681,944	680,647	679,257
	K2(CO2)-2	681,933	679,832	678,6	677,482	675,93	674,6	673,376
	K2(CO2)-3	682,816	680,132	678,71	677,488	675,914	674,548	672,947
	K2(CO2)-4	694,967	691,669	690,063	688,692	687,223	685,852	684,439
	K3(CO2)-1	676,475	674,173	672,878	671,752	670,473	669,255	667,981
	K3(CO2)-2	669,407	667,191	665,993	664,924	663,662	662,491	661,335
K3(CO2)-3	670,943	668,02	666,5	665,245	663,824	662,206	660,766	
K3(CO2)-4	678,704	676,266	674,966	673,804	672,477	671,25	669,8	

Tabel L4.4.2 CO₂-ga rikastamata krohvide veeauruläbivuse kaaluandmed

CO ₂ -ga rikastamata krohvide veeauruläbivuse kaaluandmed koos vormiga								
		05.05. kuivkaal	07.05. RH 50%	08.05. RH 50%	09.05. RH 50%	10.05. RH 50%	11.05. RH 50%	12.05. RH 50%
Tüüp	Katsekeha	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal	Kaal
Silinder	TK-1	677,835	675,74	674,435	673,29	671,959	670,458	669,182
	TK-2	678,96	675,46	673,856	672,61	671,28	669,832	668,516
	TK-3	681,5	679,604	678,303	677,122	675,786	674,445	673,24
	TK-4	687,166	684,905	683,566	682,374	681,057	679,694	678,321
	TP-1	671,432	669,056	667,25	665,935	664,402	662,793	661,246
	TP-2	666,422	664,137	662,712	661,46	660,079	658,636	657,294
	TP-3	684,175	681,78	680,336	679,008	677,596	676,101	674,26
	TP-4	683,231	680,861	679,506	678,312	676,94	675,589	674
	K1-1	681,242	679,489	678,367	677,448	676,316	675,222	674,217
	K1-2	692,724	691,115	690,05	689,042	687,986	686,877	685,45
	K1-3	685,406	683,82	682,789	681,852	680,864	679,771	678,739
	K1-4	673,637	671,944	670,821	669,669	668,406	667,295	666,191
	K2-1	679,859	678,048	676,888	675,796	674,545	673,334	672,02
	K2-2	686,752	685,07	683,819	682,681	681,34	680,169	678,904
	K2-3	672,925	671,279	670,151	669,127	667,964	666,706	665,52
	K2-4	671,038	669,085	667,693	666,507	665,21	663,884	662,455
	K3-1	677,26	675,517	674,395	673,434	672,247	671,219	670,071
	K3-2	680,956	678,98	677,837	676,794	675,583	674,494	673,353
	K3-3	692,988	691,436	690,348	689,383	688,298	687,254	686,213
	K3-4	684,085	682,373	681,192	680,154	679,066	678,012	676,968