



TALLINNA TEHNICAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

KATSED MATERJALIDE NIISKUSLIKE OMADUSTE MÄÄRAMISEKS

EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINING HYGRIC PROPERTIES OF MATERIALS

INSENERIÕPPE LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Karl Margus

Üliõpilaskood: 165178EAEI

Juhendaja: Paul Klõšeiko
ekspert

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.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi) (sünnikuupäev:)

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

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

(juhendaja nimi)

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.

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

Ehituse ja arhitektuuri instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Karl Margus, 165178EAEI

Õppekava, peeriala: EAEI02/15, Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, ehitustehnika

Juhendaja(d): Ekspert, Paul Klõšeiko, paul.kloseiko@taltech.ee

Konsultant:(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Katsed materjalide niiskustlike omaduste määramiseks

(inglise keeles) Experimental methods for determining hygric properties of materials

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Juurutada kuivamise ja rõhuplaadi katsed ja töötada välja mitteisotermiline topsikatse
2. Uurida puidu, kaltsiumsilikaadi ja silikaattellise auru- ja vedelikuvoogude jaotust niiskes keskkonnas
3. Katsetes mõõdetud tulemuste võrdlemine varasemate materjali failidega (IBK Delphin ja kirjandus)

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katseseadmete ehitus ja ettevalmistus	31.05.2021
2.	Materjalikatsete läbiviimine	31.08.2021
3.	Tulemuste analüüs	31.11.2021

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 20. detsember 2021. a

Üliõpilane: Karl Margus ".....".....202....a
/allkiri/

Juhendaja: Paul Klõšeiko ".....".....202....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....202....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....202....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1. Sissejuhatus teemasse, teoreetilised alused	11
1.1 Ehitusfüüsika teoreetiline alus	11
1.1.1 Veeauru difusioon	11
1.1.2 Vedela vee juhtivus	11
1.1.3 Hügrokoopne ja ülehügrokoopne niiskusvahemik	13
1.1.4 Niiskussisalduse hüsterees	14
1.2 Materjalikatsete teoreetilised alused	15
1.2.1 Isotermilise ja mitteisotermilise topsikatse alused	15
1.2.2 Kuivamiskatse teoreetilised alused	20
1.2.3 Rõhuplaadikatse teoreetilised alused	21
2. Metoodika	23
2.1 Materjalikatsed	23
2.1.1 Uuritavad materjalid	23
2.1.2 Katsekehade vaakumküllastamine eksikaatoris	25
2.1.3 Isotermiline ja mitteisotermiline topsikatse	27
2.1.4 Kuivamiskatse	32
2.1.5 Rõhuplaadikatse	37
2.2 IBK Delphin	44
3. Tulemused ja analüüs	48
3.1 Isotermiline ja mitteisotermiline topsikatse	48
3.2 Kuivamiskatse	61
3.3 Rõhuplaadi katse ja sorptsioonkõverad	70
KOKKUVÕTE	75
SUMMARY IN ENGLISH	78
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	81
LISAD	82
Lisa 1. Tuuletunneli koostejoonis	82

EESSÕNA

Antud töö teema sai alguse arutades Paul Klõseikoga võimalikke vajalikke uurimisteedest. Algsed arutelud hõlmasid endas erinevaid võimalikke materjalikatseid ning nende realiseerimise tõenäosust. Sai valitud välja katsed, mida otsutati antud uurimustöö raames teha ning hakati koostama katseseadmete kontseptsiooni. Kuna varasemalt on materjali niiskuslevi omadusi mõõdetud ja uuritud mõnel määral kooli peahoones ja võrdlemisi ajutistes tingimustes, siis uue õppehoone valmimisega Mäepealse 3 tekkis võimalus rajada statsionaarne labor kliimaruumi 016. Katseseadmed ja sellega kaasnev vajalik laborisisustus koondati kliimaruumi ning seni tühi ruum sisustati lähtudes katsete terviksüsteemi loomise vajadustest. Labor on varustatud erinevate töölaudade ja mõõteseadmetega, tagades maksimaalselt efektiivse ja mugava töökeskkonna katsete läbiviimiseks. Katseseadmete ehitust rahastas Tallinna Tehnikaülikool ning samuti tagas ülikool kõik antud töös läbikatsetatud materjalid. Kõikide erinevate katseseadmete väljundid moodustavad terviku, mis annab informatsiooni materjalide niiskuslevi erinevate omaduste kohta. Antud katsete väljundeid saab kasutada, et defineerida soojus- ja niiskuslevi modeleerimistarkvarades tundmatutele materjalidele omadused, et programm oskaks niiskuslevi arvutada ja niiskuslevi tarindites simuleerida. Sellisel kujul terviklabori püstatamine võimaldab nii uutele turule tulevate materjalide niiskuslevi omadusi määrata kui ka seni tuntud materjalide omadusi kontrollida. Soovin tänada Priit Petersoni ja Villu Kukke, kes aitasid katsekehade ettevalmistamisega. Suur tänu Peep Margusele, kes oli väga suureks abiks kuivamiskatse seadme konstrueerimisel ja ehitamisel. Samuti soovin tänada juhendajat Paul Klõseikot töö vältel osutatud konsultatsioonide ja abi eest.

Niiskuslevi, hügrooskoopid niiskusvahemikud, sorptsioon, inseneriõppe lõputöö

Lühendite ja tähiste loetelu

A – Katsekeha avatud külje pindala, [m²]

d_a – Õhukihi paksus, [m]

g – Veeauru voog, [kg/s·m²]

G – Massimuutude keskväärtus, [kg/s]

m_n – Mass ajahetkel t_n , [kg]

$\Delta m_{n+(n+1)}$ – Massimuut kahe järjestiku kaalumise vahel, [kg]

p – Keskkonna rõhk, [Pa]

p_c – Kapillaarrõhk, [Pa]

p_0 – Atmosfääri rõhk, [Pa]

Δp – Veeauru osarõhkude vahe, [Pa]

RH – Suhteline niiskus, [%]

R_v – Veeauru gaasi konstant, [J/(K·kg)]

S_d – Suhteline difusioonitakistus, [m]

T – Absoluutne temperatuur, [K]

W – Veeaurujuhtivus, [kg/m²·s·Pa]

W_c – Redutseeritud veeaurujuhtivus, [kg/m²·s·Pa]

Z – Veeaurutakistus, [m²·s·Pa/kg]

ρ_l – Vee tihedus, [kg/m³]

δ – Veeauruerijuhtivus, [kg/m·s·Pa]

δ_a – Õhu veeauruerijuhtivus, [kg/m·s·Pa]

μ – Veeauru difusioonitakistustegur, [-]

SISSEJUHATUS

Ehitusvaldkonna kiire areng, CO₂-jalajälje vähendamine, Euroopa reglementatsioonid ja üldine suund energia kasutamise vähendamise poole on tinginud hoone piirdetarinditele suuri muutusi. Väiksem aknapindala, paksemad tarindikihid, tõhusamad küttemeetodid on ühed võimalikest viisidest, kuidas hoone energiakadusid minimeerida. Tarindite soojuslähivuse vähendamine säästab küll küttele kuluvat energiat, kuid toob kaasa mõningaid riske. Konstruksiooni lähiv soojusenergia hoiab aga madalamat suhtelist õhuniiskust ning aitab niiskusel välja kuivada. Seetõttu on kaasnenud energiatõhusate lahenduste projekteerimisel suurenenud risk niiskuskahjustustele. Sellest tingituna tuleb hoonete projekteerimisel ning eriti renoveerimise projekti koostamisel erilist tähelepanu pöörata ehitusfüüsikalisele toimivusele.

Hoone piirdetarindite ehitusfüüsikalist toimivust saab kontrollida standardiseeritud arvutusmetoodikatega ning niiskuse akumulierumist ja välja kuivamist on võimalik modelleerida arvutiprogrammide nagu näiteks IBK Delphin. Tarindite modelleerimise puhul on oluline määrata algne niiskussisaldus ehk ehitusaegne niiskus. Määrata võimalikult täpsed ääritingimused ehk keskkond, mis ümbritseb tarindi mõlemat pinda. Määrata võimalikult täpsed materjalomadused tarindi kihtidele, mis on ka antud uurimustöö eesmärgiks. Nagu mainitud, siis programmid vajavad sisendandmeid piirdetarindites olevatele materjalidele, et niiskus- ja soojuslevi modelleerida vastavalt tegelikkusele. Näiteks võib tuua veeaurutakistuse ja soojuslähivuse. Kuna eeltoodud näitajad ei ole konstantsed, siis reeglina on lihtsate arvutuste puhul toodud välja väärtus, mis kehtib teatud materjali niiskussisalduse piires. Kõrge suhtelise niiskuse juures kasvab materjali veesisaldus hüppeliselt, eriti suure veesisalduse omandab materjal alates 95-98% suhtelisest õhuniiskusest. Veega küllastunud materjalide ehitusfüüsikalised näitajad erinevad oluliselt kuiva materjali omadest. Ühtlasi ei arvesta kastepunkti meetod kapillaarset vedelikujuhtivust. Seetõttu ei piisa niiskuslevi seisukohast ühedimensioonilise käsiarvutuse tegemisest, et veenduda kas projekteeritav keerukas piirdetarind ka niiskustehniliselt toimiv on.

Materjalitehnoloogia kiire arenguga kaasneb uute innovaatiliste toodete tekkimine turule. Selleks et määrata modelleerimiseks vajalikke sisendandmeid niiskuslevi modelleerimise programmidele, tuleb katsetada uuritavate materjalide käitumist erinevates niiskussisalduste vahemikes. Antud uurimustöös määratakse baasmaterjali omadused ning uuritakse niiskuslevi käitumist erinevate ääritingimuste korral kolmel katsetataval materjalil: puit (kuusk), silikaattellis ja kaltsiumsilikaat. Mainitud materjalidega viiakse läbi kolm erinevat katset, mida simuleeritakse ka niiskus- ja soojuslevi tarkvaras IBK Delphin. Antud materjalides on niiskuslevi käitumine vägagi

erinev ning töös läbiviidavad katsed annavad põneva võrdlusmomendi katsetulemuste analüüsil.

Esimeseks katseks on isotermilised ja mitteisotermilised topsikatsed. Katse jaoks valmistatakse ette külmkapp, mille sisse paigaldatakse sahtlitasandid, millest ühel asub õhuniiskust hoidev soolavann ja teistel tasanditel asuvad katsetopsid. Iga tasand on varustatud ventilaatoritega, mis tagavad õhuringluse katsetopside kohal. Külmkapi üks asendatakse puidust raamiga, mille sisse kinnitatakse soojustusplaat. Soojustusplaadi sisse freesitakse sobivad augud ning seejärel paigaldakse sinna mitteisotermiline katsetops koos katsekehaga nii, et külmkapipoolse materjali pinnatemperatuur on madalam, kuid suurema suhtelise õhuniiskusega kui kliimakambripoolne materjalipind. Seeläbi proovitakse tekitada olukord, kus niiskuslevi ja soojuslevi on erisuunalised läbi katsekeha. Isotermilise topsikatse puhul viiakse läbi küllaltki standardiseeritud märja ja kuiva topsi katse. Katsetopsid paigaldatakse külmkappi sahtlitasanditele. Märja topsi puhul toimub niiskuslevi suunaga topsist välja ja kuiva topsi puhul suunaga topsi sisse. Iga topsitüübi puhul viiakse katsed läbi iga uuritava materjaliga, lisaks uuritakse puidu puhul eraldi niiskuslevi risti- ja pikikiudu. Katsekäigul mõõdistakse suhtelist õhuniiskust ja õhutemperatuuri külmkapis, kliimakambris ja mitteisotermilistes topsides. Jälgitakse kaalu muutust ajas ning seeläbi saab uurida niiskusvoo intensiivsust aja jooksul, sellest omakorda saab tuletada difusioonitakistusteguri.

Teise katsena võib välja tuua kuivamiskatse. Kuivamiskatse jaoks valmistatakse kahelt küljelt ventilaatoritega varustatud tuuletunnel, mille alapõhjas asuvasse sahtlisse asetatakse veega vaakumküllastatud katsekehad. Iga materjali kohta valmistatakse ette kolm katsekeha, mille ülejäänud tahud isoleeritakse nii, et väljakuivamine saaks toimuda ainult läbi pealispinna. Samuti uuritakse siin puidu puhul niiskuslevi risti- kui ka pikikiudu. Konstantse õhuvoolu, õhutemperatuuri ja suhtelise õhuniiskusega keskkonnas uuritakse materjali väljakuivamist ehk materjalide desorptsiooni ülehügrooskoopset niiskusvahemikus. Fikseeritakse katsekehade kaalu ajas ning seeläbi saadakse materjalide kuivamiskõverad ja kuivamiskiirused erinevate niiskussisalduste juures. See annab aimu materjali vedeliku- ja veeaurujuhtivuse kohta.

Kolmanda ja viimase katsena tehakse rõhkplaadi katse. Katse on rohkem tuntud pinnase omaduste määramiseks, täpsemalt poorsuse leidmiseks. Katse puhul kasutatakse spetsiaalset Soilmoisture 1500f2 rõhkplaadi seadet, mis võimaldab materjali niiskussisaldusel tasakaalustuda seadmega tekitatud poorirõhuni. Katses uuritakse iga materjali puhul kolme katsekeha. Katseseadmes tekib olukord, kus õhk liigub suurema rõhuga alalt läbi katsekeha pooride, surudes sealt vee välja. Eraldunud vesi surutakse läbi keraamiliste rõhuplaatide ning edasi väljub katseseadmest vesi läbi peenikeste

voolikute. Mida peenemad on poorid, seda suuremat rõhku on vaja, et vesi eralduks pooridest. Katsekäigus jälgitakse eralduva vee hulka. Kui teatud ajaperioodi vältel vett katseadmest ei eraldu, tähendab see seda, et katsekehad on tasakaalu saavutanud antud rõhutaseme juures ja nende kaal fikseeritakse. Lõpptulemusena saadakse uuritavate materjalide niiskussisaldused poorirõhkude 30 000-150 000 Pa juures. See terviklikult moodustab materjali sorptsioonkõvera, mis katab suure osa ülehügrokoopsest piirkonnast.

1. Sissejuhatus teemasse, teoreetilised alused

1.1 Ehitusfüüsika teoreetiline alus

1.1.1 Veeauru difusioon

Üldiselt on erinevates kirjandustes ja arvutuseeskirjades käsitletud niiskuslevi peamiselt veeauru difusiooni ja veejuhtivusena. Veejuhtivusel on tavapärastes olukordades marginaalne mõju niiskuslevile ning seetõttu räägitakse peamiselt veeauru difusioonist. Veeauru difusioon materjalides on mõjutatud õhu veeauru erijuhtivusest, materjali poorstruktuurist ja niiskussisaldusest. Veeauru voo suund sõltub veeauru osarõhust, see tähendab, et veeaur liigub suurema osarõhuga keskkonnast väiksema õhurõhuga keskkonda. Üldjuhul esitletakse arvutustes veeauru juhtivust tavaliselt veeauru difusioonitakistustegurina μ [1]. Tegur iseloomustab, mitu korda väiksem on niiskusvoog konkreetses materjalis kui seisvas õhus. Tegurit käsitletakse arvutustes enamjaolt konstandina, kuigi selle väärtus sõltub materjali veesisaldusest. Mida suurem on niiskussisaldus, seda suurem on niiskusjuhtivus. Kui materjali veesisaldus tõuseb, suureneb veeaurujuhtivus ning sõltuvalt materjalist lisandub ka teatud niiskussisalduse taseme juures veejuhtivus [2].

1.1.2 Vedela vee juhtivus

Vedelikujuhtivus on üldjuhul tuletatav veeauru difusioonitakistusteguri määramise meetodikast. Veeauru juhtivuse saab tuletada standardi ISO 12572 arvutuseeskirjade alusel, mille abil tavaliselt deklareeritakse materjalide veeauru difusioonitakistustegur. Tegur μ veeaurujuhtivuse näol on tuletatav kuiva topsti katsest, kus asetatakse katsekeha kahe erineva suhtelise õhuniiskusega keskkonna vahele. Seejuures fikseeritakse regulaarse kaalumisega katsekeha massi muut ajas ning hiljem tuletatakse sellest niiskusvoog läbi katsekeha. Topstikatseid, kus ühel pool katsekeha on kõrge suhtelise niiskuse, nimetatakse märja topsti katseteks. Sel juhul sisaldab määratud difusioonitakistustegur μ endas nii auru kui ka vedeliku juhtivust. Märja ja kuiva topsti katsetest tuletatakse erinevad niiskusjuhtivused. Standardsete kliimatingimuste korral kuiva topsti katsetes niiskusjuhtivus saab suurendada ainult veeauru juhtivuse näol. Märja topsti puhul sisaldab niiskusvoog endas lisaks veeauru juhtivusele ka vedeliku juhtivust. Vedelikujuhtivust saab tuletada lahutades märja topsti niiskusjuhtivusest kuiva topsti aurujuhtivuse [1], [3].

Vedela vee juhtivus materjalis sõltub poori kapillaarrõhust. Tänu kohesioonile ja adhesioonile seob poorides olev vedel vesi pindpinevuse tõttu end tihedalt poori seina

külge. Veemull on kausja kujuga ning seina ja mulli kausja serva puutujaga moodustub nn kontaktnurk γ . Poorist lahkuva vedeliku puhul võib täheldada märgatavalt väiksemat kontaktnurka kui poori siseneval veel. Kontaktnurk sõltub lisaks veel materjalist, pooriseina karedusest ja pooris oleva vedeliku viskoossusest. Kontaktnurgal on oluline mõju sorptsioonkõveratele, kui uurida niiskuslevi materjali pooris [1], [4]. Kapillaarrõhu väärtus on arvutatav alljärgneva valemiga.

$$p_c = \rho_l \cdot R_v \cdot T \cdot \ln RH$$

kus

p_c – kapillaarrõhk, [Pa]

ρ_l – vee tihedus, [kg/m³]

R_v – veeauru gaasi konstant, [461,5 J/(K·kg)]

T – absoluutne temperatuur, [K]

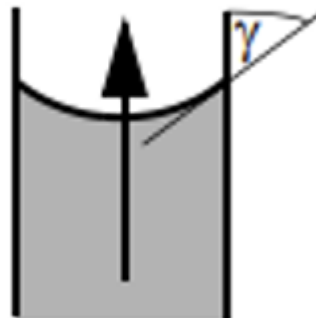
RH – suhteline niiskus, [%]

[1]

Poorist lahkuv vesi



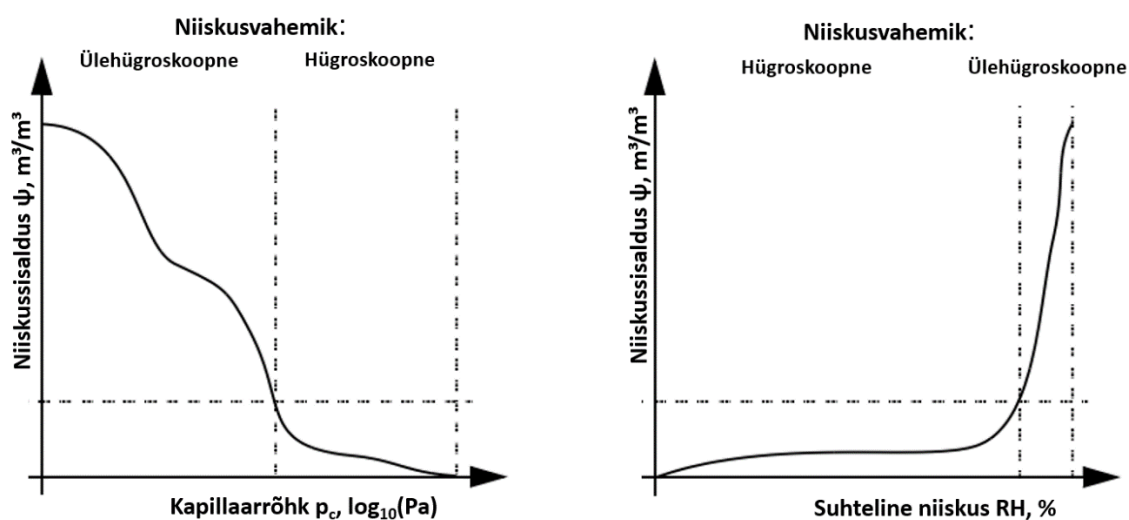
Poori sisenev vesi



Joonis 1.1 Kontaktnurk pooris oleval vedelikul. Allikas: [1]

1.1.3 Hügrokoopne ja ülehügrokoopne niiskusvahemik

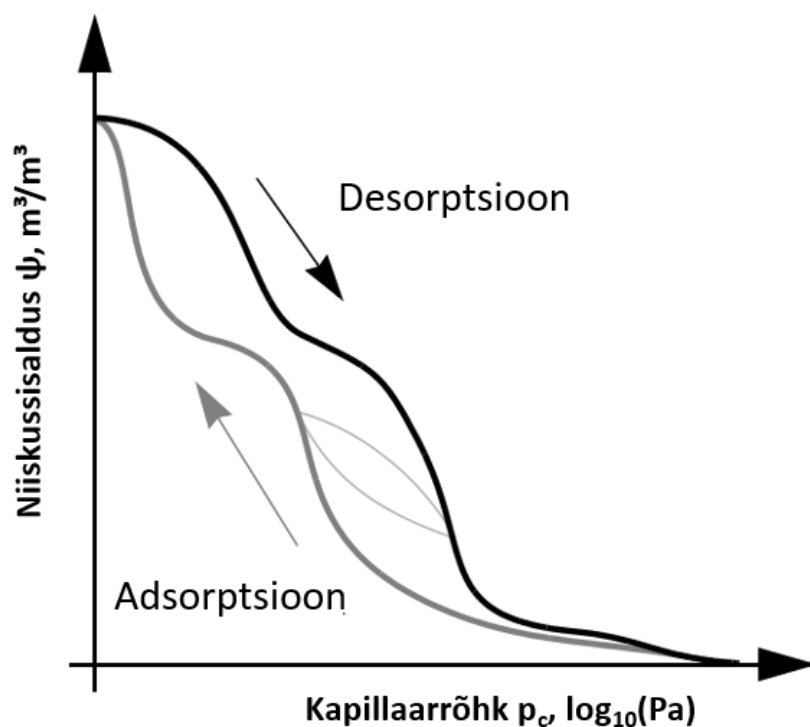
Materjali niiskussisaldust kuivast küllastunuks käsitletakse üldjuhul kahe niiskussisalduse vahemikuna: hügrokoopne ja ülehügrokoopne niiskusvahemik. Vahemike täpsed piirid ei ole üheselt määratavad, kuna vahemikud kanduvad sujuvalt üle üksteisesse. Vahemike defineeritavus sõltub kindlatest materjaliomadustest. Hügrokoopne niiskusvahemik esineb, kui suhteline õhuniiskus jääb vahemikku 0–95/98%. Selles vahemikus absorbeeruvad veemolekulid materjali poori seinale, kuid veel ei moodusta vedelal kujul seotud vett. Veeaurujuhtivus domineerib täielikult vedelikujuhtivuse üle madalama suhtelise niiskuse korral ja vahemiku ülemises otsas on mõlemad enam-vähem samaväärsed. Ülehügrokoopne niiskusvahemik algab vastavalt 95–98% suhtelise õhuniiskuse juures ning teiseks piiriks on materjali veesisalduse täielik küllastumisaste. Absorbeerunud vesi kondenseerub poori seinale vedelaks veeks ning veejuhtivus suureneb oluliselt ning veeaurujuhtivus langeb, kuni lõpuks toimub kogu niiskuslevi läbi vedelikujuhtivuse. See on tingitud sellest, et poorid täituvad vedela veega ning veeaur ei pääse läbi pooride, vaid kondenseerub pinnale. Poori võimekus niiskust talletada sõltub suhtelisest õhuniiskusest ja kapillaarrõhust. Maksimaalse niiskussisalduse funktsioon varieerub oluliselt erinevate õhuniiskuste ja kapillaarrõhu tasemete korral ja seetõttu tuleb neid mõlemaid arvestada arvutustes. Materjali kasutusolukorras on siiski peamiselt oluliseks muutujaks suhteline õhuniiskus. Üldiselt mida suurem on kapillaarrõhk, seda väiksem on potentsiaalne niiskussisaldus ja mida suurem on suhteline õhuniiskus, seda suurem on potentsiaalne niiskussisaldus. Ülehügrokoopsetes vahemikus kasvab materjali maksimaalne niiskussisaldus eksponentsiaalselt suhtelise niiskuse suurenedes [1], [2].



Joonis 1.2 Hügrokoopne ja ülehügrokoopne niiskusvahemik sõltuvalt kapillaarrõhust ja suhtelisest niiskusest. Allikas: [1]

1.1.4 Niiskussisalduse hüsterees

Vedeliku liikumine ja selle talletumine pooridesse sõltub erinevatest muutujatest. Poorist lahkuv vesi moodustab pooriseinaga palju teravama kontaktnurga ja püsib adhesiooni ning kohesiooni jõudude toimet pikemalt mööda materjali seina kui poori sisenev vesi. See on üheks põhjusteks, miks adsorptsiooni ja desorptsiooni graafikuid uurides läheb desorptsiooni korral vaja suuremat kapillaarrõhu taset, et saavutada sama niiskussisaldus. Hüsterees on antud hetkel asjaolu, et kahe protsessi puhul läheb sama niiskussisalduse saavutamiseks vaja erinevaid rõhutasemeid. Lisaks kontaktnurgale on protsesside erinevusel veel mõningaid põhjuseid. Desorptsiooni korral on mõningad suuremad poorid ühendatud poorisüsteemiga ainult läbi väiksemate pooride ning vesi ei saa sealt lahkuda enne, kui rõhutaseme on piisav, et teda ühendavad väiksemad poorid vabaneksid veest. Seda nimetatakse pudelikaela efektiks ning sama kehtib adsorptsiooni puhul, kui suurem poor sisaldab õhku, mis ei saa sealt lahkuda, kuna teda ühendavad väiksemad poorid on veega küllastunud. Lisaks mängivad rolli pooriseina muutused kokkupuutel vedelikuga nagu näiteks materjali kahanemine ja paisumine. Seega niiskussisaldus varieerub suhtelise niiskuse ja kapillaarrõhu väärtuse korral sõltuvalt protsessist, küll aga ei varieeru niiskussisalduse puhul niiskusjuhtivus [1], [2].



Joonis 1.3 Niiskussisalduse hüsterees. Allikas: [1]

1.2 Materjalikatsete teoreetilised alused

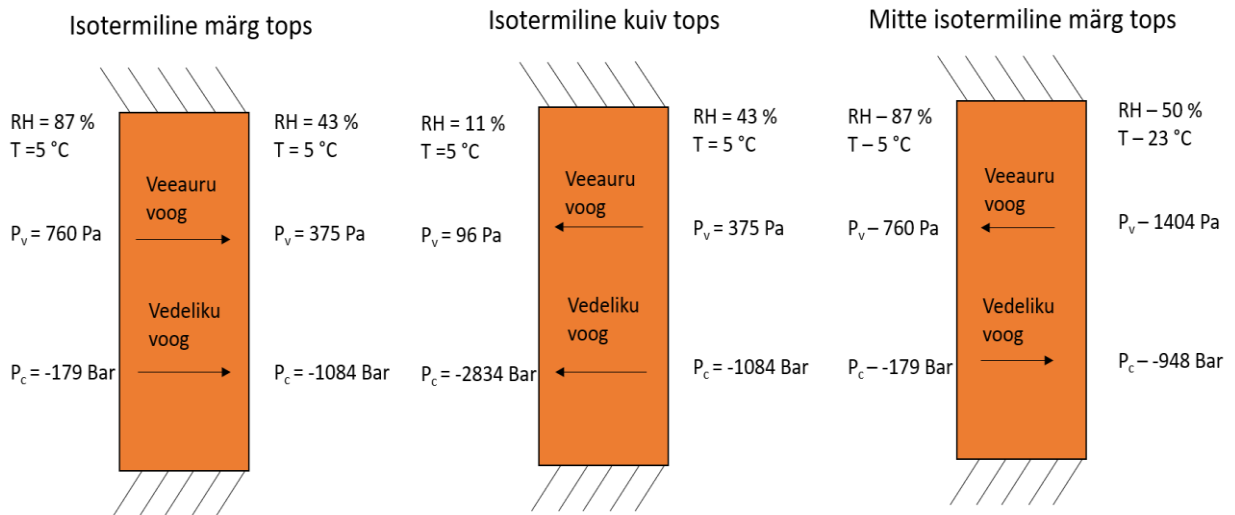
1.2.1 Isotermilise ja mitteisotermilise topsikatse alused

1.2.1.1 Üldpõhimõte

Standardsete isotermiliste topsikatsete puhul asetseb materjal kahe erinevate kliimatingimustega keskkondade vahel ning niiskuslevi toimub läbi katsekeha. Mõlemale poole katsekeha tekitatakse soovitud temperatuur ja suhteline niiskus ning niiskusvoog on suurema potentsiaaliga keskkonnast madalamasse. Potentsiaaliks on veeauru osarõhk, veeauru voog on suunaga suurema osarõhuga keskkonnast madalamasse. Regulaarse kaalumise abil fikseeritakse veeauru voog ajas ning kui niiskussisaldus materjalis on antud ääritingimuste korral tasakaalustunud, on ka niiskusvoog stabiilne ja saab arvutada veeauru difusioonitakistusteguri. Katsega saab määrata veeauru juhtivust erinevate niiskussisalduste puhul. Sõltuvalt ääritingimustest kutsutakse seda märja või kuiva topsi katseks. Märja topsi katse puhul sisaldab tuletatud difusioonitakistustegur ka vedelikujuhtivust. Seega koosneb materjali niiskuslevi vedeliku ja aurujuhtivusest [5].

Nagu maintud, siis summaarne niiskuslevi koosneb veeauru ja vedeliku voost. Veeauru potentsiaaliks on veeauru osarõhk ja vedeliku voo potentsiaaliks on kapillaarrõhk. Vedelik liigub suurema kapillaarrõhuga keskkonnast madalama kapillaarrõhuga keskkonda. Kapillaarrõhk sõltub temperatuurist ja suhtelisest niiskusest. Nimelt mida suurem on suhteline niiskus ja mida suurem on temperatuur, seda suurem on ka kapillaarrõhk. Kuna standardsetel katsetel on keskkondade erinevuseks ainult suhteline õhuniiskus, on kapillaarsusel alati imav mõju madalama suhtelise niiskusega keskkonnas [1]. See tingibki standardkatsete puhul olukorra, kus vedeliku ja veeauru vood on samasuunalised.

Antud töös proovitakse luua lisaks standardsele märja ja kuiva topsi katsele ka mitteisotermiline topsikatse. Sel juhul on ühel pool katsekeha suurema suhtelise niiskuse, kuid külmema temperatuuriga keskkond ja teisel pool katsekeha oluliselt soojem, kuid madalama suhtelise niiskusega keskkond. Seetõttu on niiskemas keskkonnas veeauru osarõhk madalam ning veeauru voog on suunaga soojemast keskkonnast külmemasse. Kuna kapillaarne veejuhtivus sõltub aga suhtelisest niiskusest ja temperatuurist, siis on soojemas keskkonnas madalam kapillaarrõhk. See tingib selle, et kapillaarne vedelikuvoog on vastupidise suunaga veeauru voole.



Joonis 1.4 Niiskuslevi põhimõttelised skeemid

1.2.1.2 Katseseadme kontseptsioon ja disain standardi ISO 12572:2016

kohaselt

- Katsetopsid peavad olema korrosioonikindlad kas kuivatusaine või soolalahuse suhtes, mis on vastavas katsetopsis. Tüüpiliselt tehakse topsid klaasist või metallist.
- Topsi kaas, mis eraldab kahte keskkonda ja mille keskele pannakse katsematerjal, peab olema kergesti töödeldav, et katsematerjali kinnitada. Katsematerjali pindala peaks olema vähemalt 90% kaane pindalast, et vältida mittelineaarset veeauru levikut.
- Mõõtmeseadmete täpsus peaks olema täpsusega $\pm 0,2$ mm või mõõtehälbega $\pm 0,5\%$, sõltuvalt kumb on täpsem. Jäikade materjalide jaoks mõõdetakse katsekehade paksust neljast erinevast positsioonist, ümbermõõdu suhtes võrdsetel kohtadel. Leida tuleb keskmine paksus iga katsekeha jaoks.
- Kaalumise täpsus võiks olla $\pm 0,001$ g soojustusmaterjalide puhul, raskemate ehitusmaterjalide puhul $\pm 0,01$ g.
- Katsekambris võiks olla konstante suhteline niiskus hälbega $\pm 5\%$ ning konstante õhutemperatuur hälbega $\pm 1^\circ\text{C}$. Õhuvoolu kiirus peaks olema vahemikus 0,02 m/s kuni 0,3 m/s.
- Sensorid ja logerid peaksid salvestama pidevalt õhutemperatuuri, suhtelist õhuniiskust ja õhurõhku. Sensorid peavad olema kalibreeritavad teatud aja tagant.
- Katsetopsi kaas, mis peab olema veeauru praktiliselt mittejuhtivast materjalist, ei tohi füüsikaliselt või keemiliselt muutuda katse ajal ning ei tohi põhjustada keemilisi või füüsikalisi muutuseid katsematerjalile.

- Kuivatusaine või aurustuv vedelik tuleks valada topsi vähemalt 15 mm kihina. Õhukihi paksus materjali ja vedeliku vahel peaks olema vähemalt 15 ± 5 mm. Õhukihi paksuse määramine tuleb mõõta täismillimeetrites võimalikult täpselt, et selle põhjal saaks arvutada veeauru takistust. See on eriti oluline väikse veeaurutakistusega materjalide puhul, mille $S_d < 0,1 m$.
- Katsekehade kaalumise peaks toimuma keskkonnas, kus õhutemperatuur on $\pm 2^\circ\text{C}$ katsekeskkonnast erinev. Kui võimalik, kaaluda katsemasinas. Kaalumist tuleb jätkata, kuni 5 järjestikul päeval saadud väärtused ei erine üksteisest $\pm 5^\circ\text{C}$. Katse tuleks peatada koheselt, kui kuiva topsi katses mass suureneb rohkem kui 1,5 g 25 ml kuivatusaine kohta või kui märja topsi katses katsekeha mass väheneb poole võrra algsest lahuse massist.

[6]

1.2.1.3 Katsekeha üldiselt printsiibid ja katsematerjali ettevalmistus ISO 12572:2016 kohaselt

Kui katsematerjalil on lisakihid, siis tuleb katsematerjalid testida selliselt, et veeauru levi toimuks kasutusolukorras ettenähtud suunas. Lisakihid võib eemaldada, kui on mõeldud katsetada põhimaterjali enda omadusi. Kui pole teada niiskuslevi suund kasutusolukorras, siis tuleb katsetada niiskuslevi läbi materjali mõlemas suunas. Katsematerjali pinda ei tohiks kahjustada selliselt, et see võiks mõjutada veeauru levikut materjalis.

Katsekeha võiks võimaluse korral mitte lõigata ning olla terviktoode. Kui see ületab 100 mm, siis võib katsekeha väiksemaks lõigata. Mittehomogeensete materjalide korral nagu betoon peaks olema materjal vähemalt 3 korda paksem kui on materjali kõige suurem täitematerjali mõõde. Katsekeha minimaalne paksus võiks olla vähemalt 20 mm. Kui katsekeha pindala on vähem kui $0,05 m^2$, siis peaks tegema vähemalt 5 katset, muidu piisab 3 katsest.

Enne katsetamist peaks kõiki katsekehi talletama keskkonnas õhutemperatuuriga $23 \pm 5^\circ\text{C}$ ja suhtelise õhuniiskusega $50 \pm 5\%$. Katsekehad peavad püsima keskkonnas kuni nende kaalude muudu erinevus ei ületa 5% kolme järjestiku päeva jooksul.

Madala veeauru takistusega materjalidel, mille $S_d < 0,1 m$, tuleks kasutada märja topsi katset. Topsis on destilleeritud vesi, mis tagab topsis 100% suhtelise õhuniiskuse. Suur niiskuse voolu hulk läbi katsekeha väldib kondensatsiooni tekkimist katsekeha alumisele poolele, mis on oht suure veeaurutakistusega materjalide puhul. Sel juhul tuleb õhkvahe vee pealispinna ja materjali aluspinna vahel fikseerida ning tagada piisavalt kiire õhuvool katsematerjali pealispinnale. Materjalidel, mille $S_d < 0,2 m$, tuleb lisaks arvestada katsekeha ja soolapinna vahel oleva õhukihi veeauru takistust. [6]

1.2.1.4 Arvutuste alused ISO 12572:2016 kohaselt

- **Massi muut**

Iga kahe järjestikku kaalumise tulemusena tuleb arvutada massi muut Δm_{12} .

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$$

kus

Δm_{12} – massi muut ajas kindlate mõõtmiste vahel, [kg/s]

m_1 – mass ajahetkel t_1 , [kg]

m_2 – mass ajahetkel t_2 , [kg]

t_2 ja t_1 – aeg kahe järjestikuse mõõtmise vahel, [s]

Seejärel tuleb arvutada G , mis on keskmine väärtus viiest viimasest massimuudust.

Viis viimast massimuutu ei tohi ükski erineda keskmisest väärtusest $G \pm 5\%$.

- **Veeauru voog**

Veeauru voog, g [kg/s·m²]

$$g = \frac{G}{A}$$

kus

A – katsekeha avatud külje pindala, [m²]

G – massimuutude keskvärtus, [kg/s]

- **Veeaurujuhtivus**

Veeaurujuhtivus, W [kg/m²·s·Pa]

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p}$$

kus

A – katsematerjali õhule avatud pindala, [m²]

G – massimuutude keskvärtus [kg/s]

Δp – veeauru osarõhkude vahe mõlemal pool katsekeha, [Pa]. Veeauru osarõhud on arvutatavad mõõtes suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri mõlemal pool katsekeha.

Kui väga hästi veeauru juhtivad materjalid on katsekehaks, mille $S_d < 0,2 \text{ m}$, siis tuleb võtta arvesse õhukihi paksust katsematerjali ja kuivatusaine või aurustuva vedeliku vahel.

$$W_c = \frac{1}{\frac{A}{G} \cdot \Delta p - \frac{d_a}{\delta_a}}$$

kus täiendavalt

d_a – õhukihi paksus, [m]

δ_a – õhu veeauruerijuhtivus [kg/m·s·Pa]

- **Veeaurutakistus**

Veeaurutakistus, Z [m²·s·Pa/kg]

$$Z = \frac{1}{W}$$

- **Veeauruerijuhtivus**

Veeauruerijuhtivus, δ [kg/m·s·Pa]

$$\delta = W \cdot d$$

- **Veeauru difusioonitakistus**

Veeauru difusioonitakistus, μ [-]

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$

kus

$$\delta_a = \frac{0,086 \cdot p_0}{R_D \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81}$$

R_D - gaasi konstant veeaurule, $462,10^{-6} \text{ Nm}/(\text{mg} \cdot \text{K})$

Antud töös arvutatakse õhu veeaurujuhtivus valemiga

$$\delta_a = \frac{0,00002306 \cdot p_0}{461,5 \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273,15}\right)^{1,81}$$

kus

p_0 – atmosfääri rõhk, [101325 Pa]

p – keskkonna rõhk, [Pa]

[6]

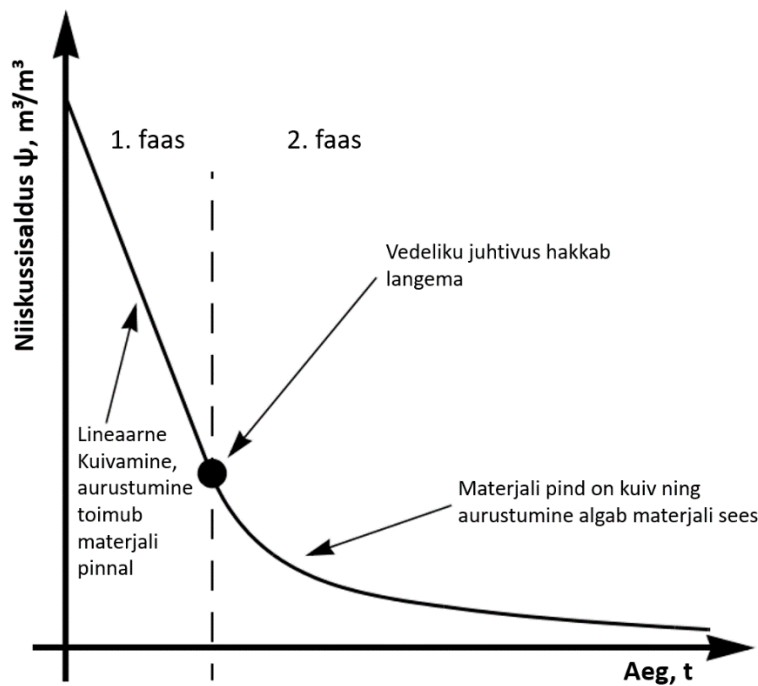
1.2.2 Kuivamiskatse teoreetilised alused

Kuivamise iseloom ehitusmaterjalides annab informatsiooni niiskuslevi omaduste kohta ülehügroskoopes niiskusvahemikus. Seega kuivamiskatses saadud tulemustega on määratud niiskuslevi parameetrid arvutusmudelites. Katse üldpõhimõte seisneb selles, et vaakumküllastatud katsekeha on avatud ühelt küljelt väljakuivamisele ning kindlate keskkonnatingimuste juures uuritakse massi muutu aja jooksul. Kuivamise iseloom sõltub suuresti materjali ääretingimustest ja seetõttu on katsed raske standardiseerida. Kuivamise protsessi täheldatakse, kui vedel vesi muutub veeauruks, ehk toimub faasimuutus. Niiskus, mis on kogunenud materjali, aurustub ümbritsevasse keskkonda. Sõltuvalt niiskussisaldusest ja materjali niiskuslevi omadustest, toimub kuivamine kahe erineva protsessina. Esimesel juhul, kui materjal on veega küllastunud, koguneb vedel vesi materjali seest materjali pinnale, kust vesi aurustub keskkonda. Teisel juhul on materjali niiskussisaldus juba oluliselt madalam ning aurustumine saab alata materjali seest, see tingib veeauru voo materjali seest väliskeskkonna poole. Esimene faas kandub niiskussisalduse langemisel sujuvalt üle teisele.

Eeldades, et materjalile mõjuvad konstantsed ääretingimused, on esimeses faasis materjali väljakuivamine lineaarne ajas. Väljakuivamise kiirus on täielikult sõltuv ääretingimustest nagu õhutamperatuur, suhteline õhuniiskus ja tuulekiirus. Teises faasis protsess aeglustub ja niiskuslevi kiirus sõltub rohkem materjali omadustest. Seega sõltub kuivamise iseloom nii materjaliomadustest kui ka konkreetsetest ääretingimustest. Lisaks eelnevale toimub materjali pinnal intensiivse väljakuivamisega esimeses faasis pinnatemperatuuri langus, mis on tingitud sellest, et vee aurustumine on endotermiline protsess.

Materjali niiskusjuhtivad omadused määravad, kui suur osa vedelast veest aurustub materjali pinnal. Reeglina on vedela vee juhtivusel palju suurem mõju väljakuivamisele kui aurujuhtivusel. Seega kuivab materjal, millel on suur vedelikujuhtivus, oluliselt kiiremini välja, kui katsekeha, mis omab väiksemat vedelikujuhtivust. Suure vedelikujuhtivusega materjalide puhul kestab esimene faas kauem, kuna vedeliku aurustumine pinnalt on aeglasem kui vee akumulatsioon materjali seest pinnale. Madala vedelikujuhtivusega materjalide puhul algab materjali teine faas üpris kiiresti, kui ääretingimused tagavad olukorra, kus materjali pinnalt aurustub vesi kiiremini, kui sinna jõuab materjalist koguneda.

[1]



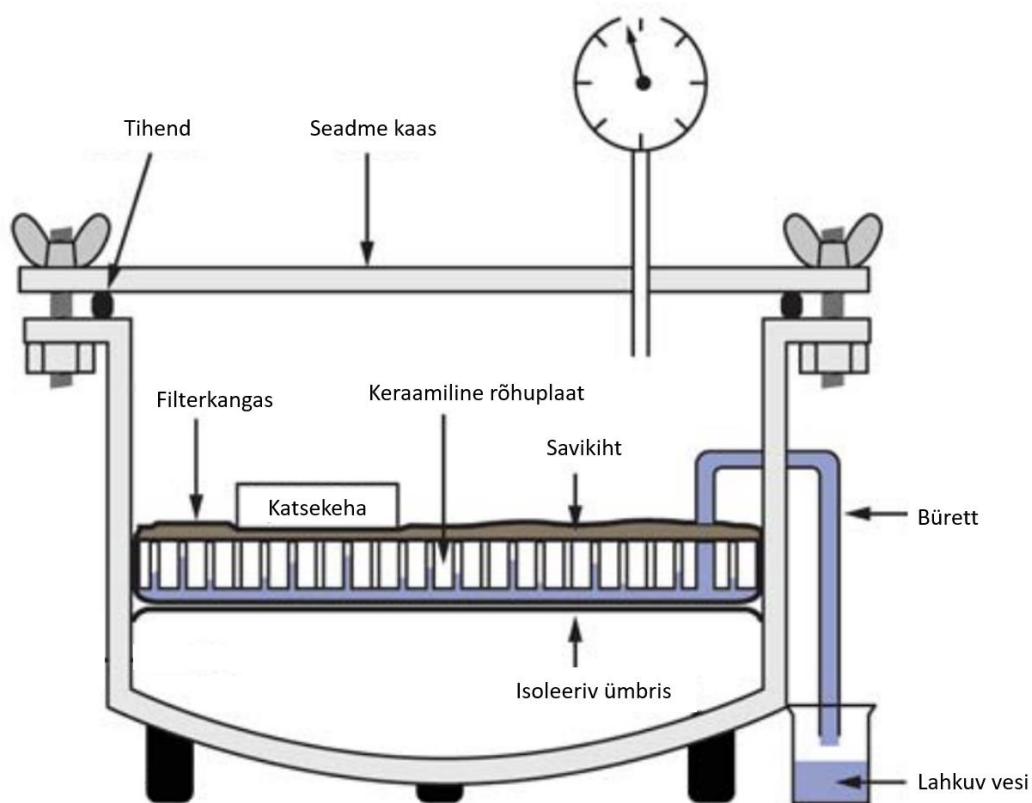
Joonis 1.5 Materjalide väljakuivamine ajas. Allikas: [1]

1.2.3 Rõhuplaadikatse teoreetilised alused

Niiskussisaldust materjalis ülehügrokoopses niiskusvahemikus kutsutakse niiskuse talletamiseks või kinnihoidmiseks, kuna enamiku katsetega mõõdetakse seda vahemikku just vee väljasurumise alusel. Ülehügrokoopses vahemikus on suhteline niiskus püsivalt maksimaalne ning veesisaldus materjalis pannakse sõltuma vaid kapillaarrõhu muutusest. Selleks asetatakse veega vaakumküllastatud katsekehad keskkonda, kus pressitakse pooridest suurendatud rõhu abil võimalik vesi välja. Mida kitsam on poor, seda suuremat rõhku läheb vaja sealt vee välja lükkamiseks. Kui katsekehad on saavutanud tasakaalustunud veesisalduse antud rõhutaseme juures, kaalutakse katsekehad ning jätkatakse kõrgema rõhutasemega. Materjali veesisaldustest vastavate rõhutasemete korral tuletatakse katsetatud materjalile desorptsiooni kõver. [1], [4]

Antud töös tehtavat katset nimetatakse rõhuplaadikatseks, mis tehakse rõhkplaadi seadmega, inglise keeles *pressure plate apparatus*. Seade koosneb rõhukambri, kuhu saab tekitada soovitava ülerõhu. Kambrisse saab asetada keraamilised plaadid, mis omavad õhutakistust nimetatud rõhutaseme juures, seeläbi lahkub süsteemist ainult vesi. Soovitav on kasutada võimalikult väikse takistusega plaati, sest suurema takistusega plaatide puhul läheb ka kauem aega, et saavutada niiskussisalduse tasakaal. Rõhuplaatide peale segatakse spetsiaalne savikiht, et tagada hüdraulilist

kontakti katsekehade ja rõhuplaadi vahel. Savikihi peale asetatakse vaheriie, mis laseks vett läbi, aga ei laseks saviosakesi katsekeha külge. Seejärel surutakse veega küllastunud katsekehad filterkanga peale, surudes katsekehad kergelt savikihti, kindlustamaks hüdraulilist kontakti savikihi ja katsekeha vahel. Katsekehade vaakumküllastamiseks asetatakse kõigepealt katsekehad eksikaatorisse, kus tekitatakse keskkonda vaakum ning seejärel asendatakse vaakum veega. Seeläbi täidetakse ka materjali väiksemad kapillaarpoorid veega. Rõhuplaadi alumine külg on ühendatud väljalasketoruga, mis ühendab rõhukambrit atmosfääri rõhuga. Seeläbi väljub katseadmetest vesi, mis on lahkunud ülerõhuga materjali pooridest. Stabiilse ülerõhu taseme juures lahkub aja jooksul pooridest vesi vastavalt katsekehade poori mõõtmetest. Katsekehad võib lugeda küllastunuks, kui 48 tunni möödudes ei ole vett rohkem lahkunud ühelt rõhuplaadilt kui 0,5 ml. Selle fikseerimiseks on väljalasketorud suunatud bürettidesse, kus mõõdetakse kolmest plaadist välja pressitud vee hulka. [7]



Joonis 1.6 Rõhukambri skeem. Allikas: [7]

2. Metoodika

2.1 Materjalikatsed

2.1.1 Uuritavad materjalid

2.1.1.1 Puit (kuusk)

Puit kui üks vanemaid ehitusmaterjale on kergesti töödeldav, tugev, kaalult kerge, soojapidav ning sitke ja hea välimusega. Kuivas kliimas on puit äärmiselt püsiv materjal. Orgaanilise materjalina on puit väga hügrokoopne ja struktuurilt heterogeenne ehk ebahomogeenne materjal. Märjumisel muutuvad puidu tugevus, mõõtmed kui ka soojapidavus. Puidu heterogeensete omaduste tõttu erinevad tugevusomadused, sooja ja veejuhtivus kiu eri suundades oluliselt. Kõrge veesisalduse juures on puidul oht mädanike kahjustustele.

Puidu elementaarkoostises on peamisteks komponentideks süsinik, vesinik ja hapnik. Absoluutselt kuivas puidus on süsinikku umbes 50%, vesinikku 6% ning hapniku koos lämmastikuga 44%, lämmastiku on puidus umbes 0,12%. Nendest elementidest moodustuvad keerukad orgaanilised ained, mida võib liigitada raku sein moodustisteks ja ekstraktiivaineteks. Raku sein moodustavaid aineid on 90-95% puidu kuivmassist.

Puidu veesisaldust käsitletakse kui puidus sisalduva vee massi suhet kogumassi. Puidus sisalduv vesi jaguneb kahte gruppi: puidustruktuuris kiudude vahel liikuv vesi ning rakuseinte aines seotud vesi. Vettinud puidus võib veesisaldus massi järgi ületada 100%. Toore puidu veesisaldus on suurem kui 25%, poolkuival kuni 18-25%, õhukuival 15-20% ja toakuival 8-13%. Temperatuuril 105 °C kuivatatud puit taastab aja jooksul oma tasakaaluniiskuse. Kuiva puidu puhul imbib vesi esmalt raku sein, hügrokoopse vee hulk kasvab kuni raku sein on küllastunud. Puidu edasisel märjumisel hakkab vesi kogunema juba raku õõnde. Sellisel kujul leiduvat vett nimetatakse kapillaarveeks. Erinevatel puiduliikidel on kiudude küllastuspunkt 23-35%.

Puidu kuivamisel aurustub vesi puidu pinnalt ning migreerub sinna tagasi puidu sisemusest. Esmalt lahkeb kapillaarvesi ning seejärel hügrokoopne vesi raku seinast. Kapillaarvee eraldumine mahumuutusi ei põhjusta, küll aga raku seinas oleva vee lahkumine. Lineaarmõõtmed võivad seejuures muutuda järgmiselt: piki tüve kuni 0,1-0,3%, radiaalsuunas 3-6% ning tangentsiaalsuunas 6-10%.

[8]

2.1.1.2 Kaltsiumsilikaat

Kaltsiumsilikaat (Ca_2SiO_4) on anorgaaliline, hügrokoopne ja kapillaaraktiivne soojustusmaterjal. Kaltsiumsilikaadi toorikud valmistatakse autoklaavis jahvatatud paekivi ja ränidioksiidi pulbri baasil. Vajaduse korral on võimalik lisada kiudu, et tõsta materjali tugevusomadusi. Kõrge tulepüsivuse tõttu kasutatakse teda ka tuleisolatsiooni materjalina. Materjal sobib potentsiaalselt seespoolseks lisasoojustamiseks muinsuskaitse all olevates hoonetes, kus on oluline säilitada ajalooline fassaad.

Kõrge niiskusmahtuvuse ja kapillaaraktiivse materjalina käitub kaltsiumsilikaadist seespoolne soojustus tõhusa niiskuse puhvrina, võimaldamaks niiskusel materjali salvestuda ning hiljem tuppä välja kuivada. Niiskes kliimas materjali poorid ahenevad. Pori suurus varieerub mõnest nanomeetrist kuni millimeetrini. Kuna materjal on kapillaaraktiivne ja madala soojusjuhtivusega kuivana, siis kuivamisprotsess erineb teistest poorsetest materjalidest nagu puit ja silikaattellis.

[9]

2.1.1.3 Silikaattellis

Silikaattellis on lubi-liiv sideaine põhjal valmistatud tehiskivi. Normaalingimustel kivinedes täitematerjali ja sideaine vahel keemilisi reaktsioone ei toimu ja mört kivineb $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallisatsiooniga ja õhus leiduva CO_2 abil karboniseerumise tõttu. Tekkinud sidemed ei ole aga vees püsivad ning on madala tugevusega. Õhklubjal on kõrge keemiline aktiivsus ränidioksiidi SiO_2 suhtes autoklaavses protsessis. Autoklaavis saavad reaktsioonid toimuda tänu kõrgendatud rõhu ja temperatuuri toimele, mida normaalingimustes ei esine. Autoklaavis toimuva reaktsiooni tulemuseks on veekeskkonnas püsivad ja kõrge tugevusega kaltsiumhüdrosilikaadi sidemed $m\text{CaO}\cdot n\text{SiO}_2\cdot p\text{H}_2\text{O}$. Lubi-liiv sideaine koosneb jahvatatud liivast ja 6-8% kustutamata lubjast, millele lisatakse täiteainena jahvatamata liiva. Segu segatakse ja lubi kustutatakse kustutustrumli vee või auru abil. Selle käigus seotakse suur osa seguveest ning segust valmistatakse toorikud. Toorikud seejärel autoklaavitakse temperatuuril 175°C rõhu 0,8-1,2 MPa juures. Moodustub läbikasvanud kristallstruktuuriga kõrge survetugevuse ja külmakindlusega tehiskivi, mida on kasutatud enamjaolt seinakonstruktsioonides. Silikaattellige survetugevus jääb piiridesse 7,5-75,0 MPa, külmakindlus vahemikku 15-35 tsükli, poorsus 10-15% ja soojajuhtivus 0,7-0,75 W/(m·K).

[8]

2.1.2 Katsekehade vaakumküllastamine eksikaatoris

Antud töös on tarvilik katsekehade kapillaarpoorid veega küllastada kuivamis- ja rõhkplaadikatsel. Selle jaoks ladustatakse katsekehad eksikaatori põhja. Katsekehadele asetatakse peale spetsiaalne plaat, mis takistab veekeskkonnas katsekehade pinnale tõusmist (Foto 2.1). Eksikaatori kaane ääred määratakse tihendava määrdekreemiga, mis hoiab ära õhulekked kaane ja anuma vahelt. Seejärel kui eksikaatori kaas on peale asetatud, ühendatakse kaane peal olev kraan vaakumpumbaga (Foto 2.2). Eksikaatorisse tekitatakse rõhk 30-40 mbari ning suletakse eksikaatori kraan. Seejärel ühendatakse lahti vaakumpump eksikaatorist ja lastakse katsekehadel 24 tundi vaakumi käes olla. See äbi saadakse õhk välja enamiku katsekehade kapillaarpooridest. Seejärel ühendatakse eksikaator voolikuga, mille teine ots asetatakse destilleeritud veega anumasse. Vett tuleks lasta eksikaatorisse kuni veetase on kõrgemal 1,5-2 cm vaheplaadi ülapiinast. Suur osa vee mahust võib imenduda katsekehadesse ja võib tekkida oht, et pealmised katsekehad ei pruugi jääda muidu veega kaetuks. Koheselt on näha, kuidas vaakumisse asetatud veest hakkab õhk pinnale eralduma, samuti eraldub mullikesi ka katsekehadest. Seetõttu rõhk tõuseb eksikaatoris mõningal määral ning on soovitatav uuesti tekitada algne vaakum eksikaatorisse, et rohkem õhku kätte saada. Katsekehad võiksid olla vaakumkeskkonnas vee all umbes 24 tundi või kuni on näha, et väikseid mullikesi katsekehade pinnalt enam vette ei eraldu. Selles etapis ei imendu vesi erilisel hulgal katsekehadesse.

Viimaks tuleb eksikaatori kraan avada ja lasta normaalrõhk eksikaatorisse. Normaalrõhuga surutakse ka vesi katsekehade tühjadesse kapillaarpooridesse. Katsekehad võiksid olla jätkuvalt 24 tundi vee all. Seega on katsekehade poorid veega vaakumküllastatud.

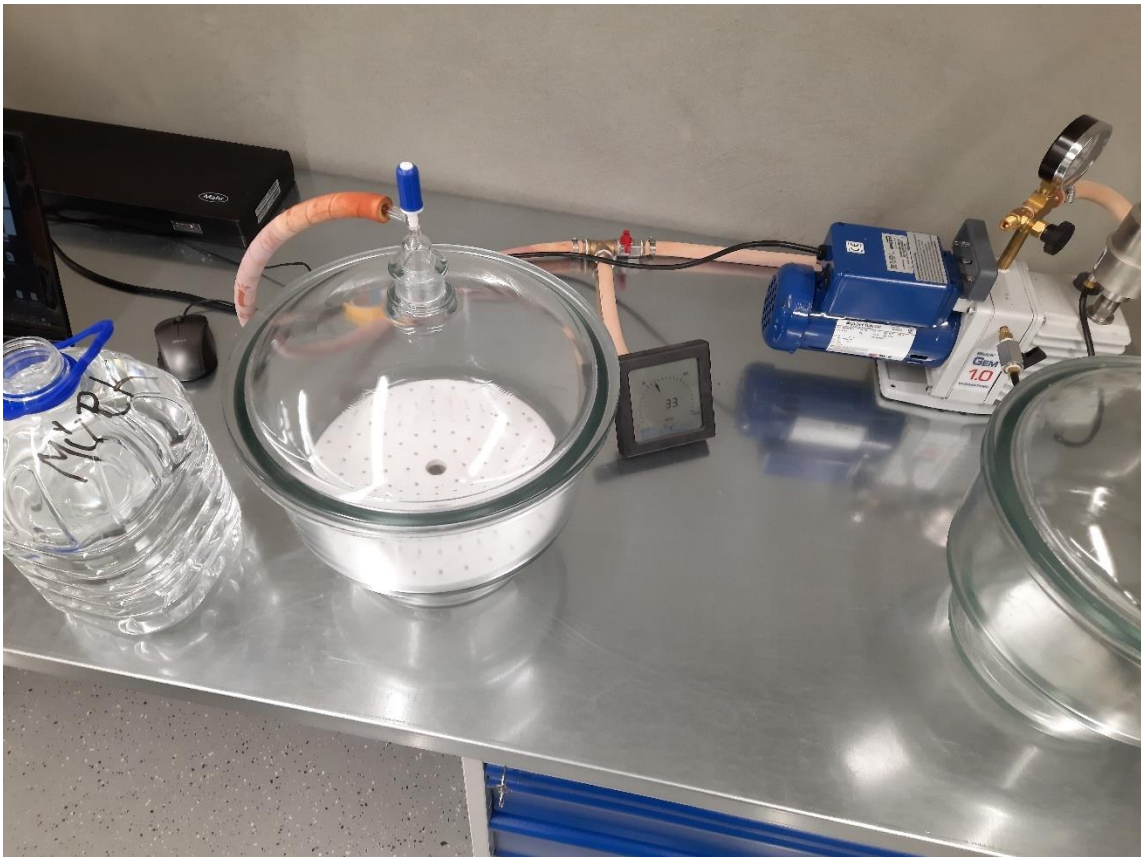


Foto 2.1 Vaakumpumbaga ühendatud eksikaator

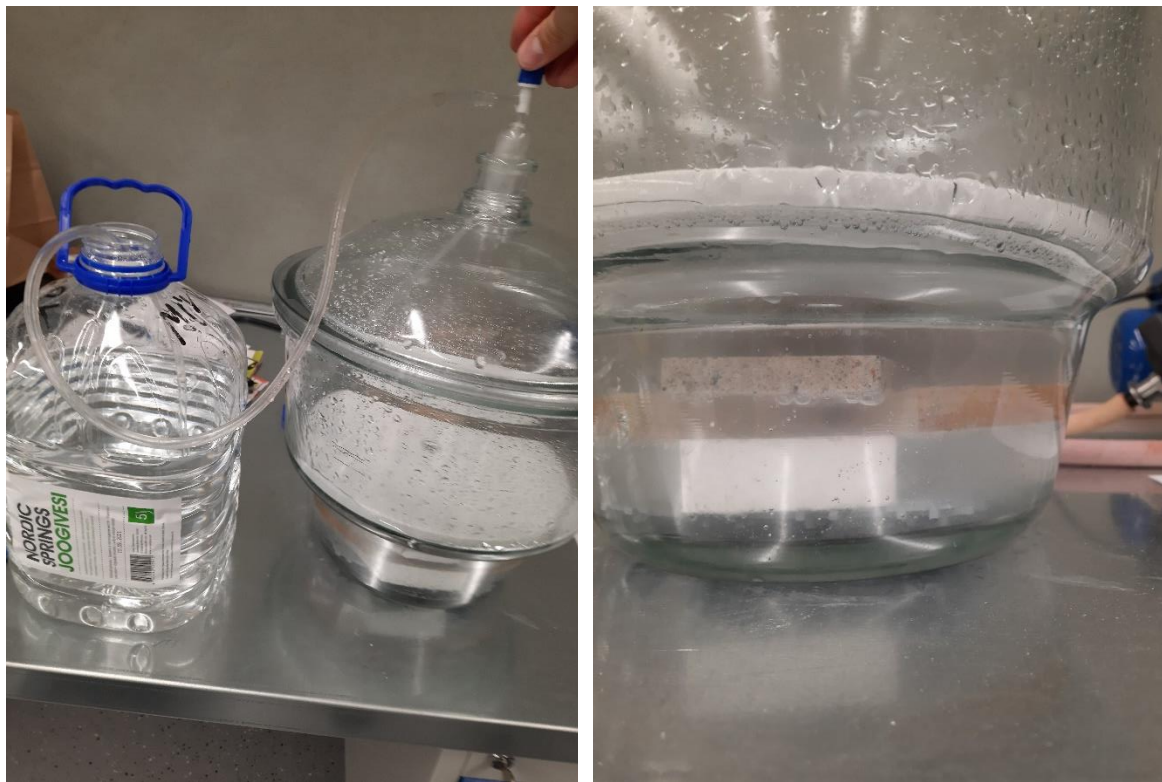


Foto 2.2 Vee imemine eksikaatorisse (vasakul) ja vee keemine madala rõhu juures (paremal)

2.1.3 Isotermiline ja mitteisotermiline topsikatse

2.1.3.1 Katseseadme kontseptsioon ja disain

Katse eesmärk on uurida veeauru difusiooni ja vedela vee liikumist läbi katsekeha määratud ääritingimuste korral. Antud töös võeti kasutusele vana veinikülmik, kuhu ehitati sisse kolm sahtlitasandit, alumine soolavanni jaoks, mis hoiab külmikus soovitud õhuniiskust ning ülemised topsikatsete jaoks. Sahtlitasandite tagumisse otsa on jäetud avad, et ventilaatorite abil oleks tagatud õhuringlus igal tasandil. Kokku paigutati külmkappi siseruumi kolm ventilaatorit, millest üks paneb suure soolavanni kohal õhu ringlema ning kaks ülejäänud ventilaatorit kindlustavad õhuringluse sahtlitasandites topsikute pealistasandis. Külmikus hoitakse kliimat +5 °C suhtelise õhuniiskuse juures $RH\ 43,13 \pm 0,50\%$ [10]. Selleks pandi alumisele sahtlitasandile klaasist ahjuvorm, mis täideti kaaliumkarbonaadi (K_2CO_3) soolalahusega. Külmkappi paigutati andur, mis fikseerib katse ajal sealset suhtelist õhuniiskust ja õhutemperatuuri. Külmkapi sisu ettevalmistust näeb fotol 2.4.

Isotermilise topsikatsena tehti kuiva ja märja topsi katsed. Mõlema katse puhul tehti neli erineva katsekehaga topsi: puitkeha niiskusvooga pikikiudu, puitkeha niiskusvooga ristikiudu, silikaattellis ning kaltsiumsilikaat. Katsed tehti külmkapis temperatuuri +5 °C juures. Kõigepealt valmistati ette topsikaaned. Topsikaane sisse oli varasemalt freesitud katsekeha pindala põhjamõõtudega auk, umbes 65*65 mm, katsekeha küljed isoleeriti butüülteibiga ning seejärel asetati alapinnaga topsikaane tasandisse ning kinnitati külge pidi butüülteibiga kaane külge, võimaldamaks niiskuse levi ainult läbi katsekeha kahe tahu. Toppide põhja asetati PUR või EPS soojustusest 40 mm kõrgune silindrikujuline väljalõige, soojustus pressiti topsi põhja võimalikult tihedalt, et soolalahuse üleslükkejõud soojustust üles ei kergitaks. Toppidesse tekitati vastav soolalahus ning fikseeriti mõõt soolalahuse pealispinnast katsekeha alapinnani, soovitud 10-20 mm. Märja topsikatse puhul asetati topsi kaaliumkloriidi (KCl) lahus, mis hoiab +5 °C juures suhtelist õhuniiskust $87,67 \pm 0,45\%$ [10]. Kuiva topsikatse puhul tekitati topsi liitiumkloriidi (LiCl) lahus, mis hoiab +5 °C juures suhtelist õhuniiskust $11,26 \pm 0,47\%$ [10]. Liitiumkloriidi käitlemisel tuleb olla äärmiselt ettevaatlik, kuna liitium on inimese jaoks mürgine. Toppidele keerati vastavad kaaned peale ning asetati külmkappi sahtlitesse. Veenduti, et tops ei oleks kontaktis külmkapi tagumise seinaga, kuna seal asub jahutuselement ning sellele kogunev kondensaad võib topsi kaalu muidu mõjutada. Toppide paiknemist on näha fotol 2.5.

Mitteisotermilise topsikatse puhul prooviti soojus- ja niiskuslevi eri suundades liikuma panna. Selleks üritati topsi sisse tekitada külmem, aga niiskem kliima kui topsist väljas. Sellise olukorra tekitamiseks otsustati katsekeha panna külmkapi ukse tasandisse. Kõigepealt võeti külmkapi originaaluks ära, seejärel ehitati veekindlast vineerist

ukseraam, mis kinnitati alumiiniumhingedega külmiku külge, raam suleti külmiku külge teiselt küljelt kahe riiviga. Ukseraami sisse paigutati 40 mm paksune PIR soojustusplaat, mis kinnitati raami külge montaaživahuga. Seejärel oli tarvis paigutada katsekeha ukse tasandisse. Oli tarvis, et katsekeha oleks külmemalt poolt võimalikult niiskes keskkonnas ja et katsekeha saaks katse ajal ukse seest eemaldada kaalumiseks. Töötati välja uksetopsi prototüüp. Topsi põhja kleebiti krõpsteibi riba, teine pool krõpsteibist kleebiti väikse plastikvanni küljele, mis kinnitati topsi sisse paikseks. Vanni sisse tekitati kaaliumkloriidi (KCl) soolalahus, mis hoiab +5 °C juures suhtelist õhuniiskust $87,67 \pm 0,45\%$ [10]. Soolavanni kohale teibiti väike ventilaator, mis tagab katse ajal ühtlase keskkonna topsis. Lisaks puuriti küljele auk, kust sisenevad topsi ventilaatori kaablid ja auk, kust paigutati topsi andur, mis mõõdab katse vältel suhtelist õhuniiskust ja temperatuuri. Topsi kaane sees paikneb katsekeha, mis kinnitati kaane külge sarnaselt märja ja kuiva topsi katsega. Ainus erinevus on see, et ukse topsi kaantele kleebiti butüülteibile peale kileteip, et topsid ei nakuks ukse aukudes oleva tihendiga. Seejärel freesiti soojustusplaadi sisse katsekeha mõõdus augud, mille servadele kleebiti paisuv tihend. Kuna mõni katsekeha oli palju õhem kui PIR plaat, siis tuli freesida ka topsi jaoks süvis ukse sisse (Foto 2.3). Katsetopsid paigutati ukse külge nii, et kaane küljest välja eenduv katsekeha asetseks tihedalt plaadi sees olevas augus. Topsi ventilaatorite kaablid ühendati külmkapis ühendusklemmide abil vooluvõrguga, mis võimaldab katse käigus topse hõlpsasti vooluvõrgust lahti- ja kokkuühendada. Mitteisotermilisi topse on samuti neli tükki erinevate materjalidega: puitkeha pikikiudu, puitkeha ristikiudu, kaltsiumsilikaat ja silikaattellis. Külmiku ukse ette asetatakse ventilaator, mis puhub õhku ukse pinnale terve katse vältel, vähendades seeläbi pinnatakistust.



Foto 2.3 Freesitud topsiaugud soojustusplaadis (vasakul) ja ukse sisse paigutatavad katsetopsid (paremal)



Foto 2.4 Külmikusse ehitatud ventilatsioonisüsteem ja sahtlid



Foto 2.5 Katseseadme sisemus (vasakul) ja suletud uksega katseseade katse ajal (paremal)

2.1.3.2 Katse käik

Katse käigus fikseeritakse niiskusvoogu läbi katsekehade. Selleks käiakse katsekehasid regulaarselt kaalumas, umbes kahel korral nädalas. Fikseeritakse kõigi 12 katsetopsi kaal. Selleks avatakse külmiku uks ning ühendatakse lahti uksetopside ventilaatoritest tulevate kaablite ühendusklemmid. Seejärel tõstetakse külmikust välja kõik topsid, suletakse külmiku uks ning teostatakse kaalumine võimalikult kiirelt. Peale kaalumist asetatakse topsid tagasi ja ühendatakse klemmid ja suletakse uks. Kogu protsess peab toimuma võimalikult kiirelt, et soojas toakeskkonnas kaalumine mõjutaks topsides niiskusvoogu võimalikult vähe. Samuti tuleb kiirustada, kuna külmiku tagapinnal toimub

intensiivne jää kogunemine perioodil, mil külmkapi uks on lahti ja ukse aukudes ei ole katsetopsi sees.

Katse vältel jälgitakse katsetopside kaalu muutust ajas. Kui näitaja stabiliseerub ehk muutub aja jooksul ligikaudu konstantseks, siis tähendab see seda, et katsekeha on antud keskkonna ääretingimuste puhul tasakaalustunud. Iga kaalumise puhul määratud niiskusvoog seostatakse ka andurite poolt mõõdetud reaalse keskkonna õhuhumidite ja suhtelise õhuhumiditega. Seeläbi saab jälgida veeauru difusioonitakistuse teguri muutumist aja jooksul.

2.1.4 Kuivamiskatse

2.1.4.1 Katseseadme kontseptsioon ja disain

Antud katseseade peab võimaldama katsekehadel välja kuivada keskkonda püsiva õhuvoolu, suhtelise õhuhumidite ja õhuhumidite korral. Seetõttu viiakse katse läbi kliimakambris, kus on püsivalt temperatuur 23 ± 1 °C ning suhteline õhuhumidite 50%. Püsiv õhuvool tagatakse ventilaatorite abil, mis on katseseadme mõlemas otsas. Katse käigus pannakse veega küllastunud katsekehad tuulekoridori põhjaga paralleelsele tasandile ning mõõdistatakse regulaarselt katsekeha massi muutust ajas ehk väljakuivamist. Samuti fikseeritakse pidevalt keskkonna õhuhumidite, suhtelist õhuhumidite, õhuvoolu hulka ning katsekehade pinnatemperatuuri.

Seega on vajalik, et:

- õhuvoolutingimused oleksid võimalikult stabiilsed, vajaduse korral muudetavad;
- temperatuur ja suhteline õhuhumidite oleksid võimalikult stabiilsed, vajaduse korral muudetavad;
- pinnatemperatuur oleks mõõdetav igal katsekehal;
- võimalik oleks proovide samaaegne mõõtmine;
- katsemasin oleks kompaktne, ent piisavalt suurte mõõtetega, tagamaks õhuvoolu ühtlustumist ning võimalikult paljude katsekehade samaaegset analüüsimist.

[11]

Katsemasina põhiskelett koosneb alumiiniumist nelikanttorust mõõtetega 30x30x2 mm. Katsemasina gabariitmõõdud on 1250x500x340 mm. Nelikanttorud on omavahel ühendatud läbi surve, kanttoru tühimikus paikneb keermelatt läbimõõduga 8 mm ning on otstest kinnitatud seibide ja mutritega, mis hoiavad skeleti mehhaaniliselt koos. Kõigepealt tehti katseseadme külgmised raamid, kuhu neediti pleksiklaas paksusega 4

mm. Seejärel puuriti külgmise raami otsapostide külgedele augud ning kinnitati otsmised raamiosad keermelatiga külgmiste raamiosade vahele. Katseseadme pealiskaas kinnitati KFR kruvidega, et vajaduse korral saaks seda hiljem lahti võtta. Katseseadme põhi koosneb viiest sahtlikandjast ja neljast sahtlist, millest igaüks on jagatud kolmeks seksiooniks. Sahtlikandjad ja sahtlid on valmistatud PVC-st paksusega 8 mm. Sahtlikandjad on kinnitatud alumiiniumprofiilile 5 mm poltide ja mutritega. Sahtli detailid on omavahel kokku liimitud spetsiaalse PVC liimiga Profine C004. Katse käigus on sahtlid hõlpsasti eemaldatavad, et tagada regulaarse kaalumise vajadust. Sahtli seksioonid on mõeldud katsetama 50x50x50 mm kuubikujulisi katsekehi, kuid sahtlisse on võimalik panna maksimaalselt 10 cm kõrge ning diameetriga 10 cm silindrikujuline katsekeha. Sahtlite pealispinna augud kaetakse fooliumteibiga nii, et jääks katsekeha jaoks sobilik ava, katsekeha kõrgust reguleeritakse EPS või muu hügrofoobse materjali abil, nii et materjali pealispind oleks samal kõrgusel kui tuuletunneli ruumi sisepind. Katsekeha isoleeritakse muudelt külgedel fooliumteibiga, nii et kuivamine saaks toimuda ainult tuuletunneli poole. Katseseadme otstes on avad alumiiniumprofiilide vahel mõõduga 440x95 mm. Otsmistele raamidele lisatakse neetamise teel alumisele küljele välja eenduv L-profiil 20x20x2 mm. Ülemisele poolele lisatakse sama profiil kahepoolse teibiga, et reguleerida tolerantsi ventilaatori ja kantprofiili vahel. Ventilaatorid on laiusmõõtudega 92x92 mm ning paksusega 25 mm. Ventilaatorid vajavad toitepinget 12 volti, iga ventilaator tarbib 0,06 amprit. Deklareeritud vooluhulk on 27,45 CFM ja õhuvoolu kiirus 1,6 m/s. Mõlemal otsmisel küljel on viis ventilaatorit, mis tekitavad hajutatud ja stabiilse õhuvoolu läbi tunneli. Ventilaatorid saavad voolu arvuti toiteploki. Ülemisele kaanele on puuritud iga katsekeha kohale auk, kust on läbi paigutatud temperatuuri andur, et mõõta katsekeha pinnatemperatuuri. Katsemasina koostajoonist vaata Lisa 1. Katsemasin on ehitatud G. Scheffleri ja R. Plagge poolt tehtud katseseadme järgi [11]. Katseseadme valmimisprotsessi on näha fotodel 2.6-2.11.



Foto 2.6 Katseseadme kandeskeleti ehitus

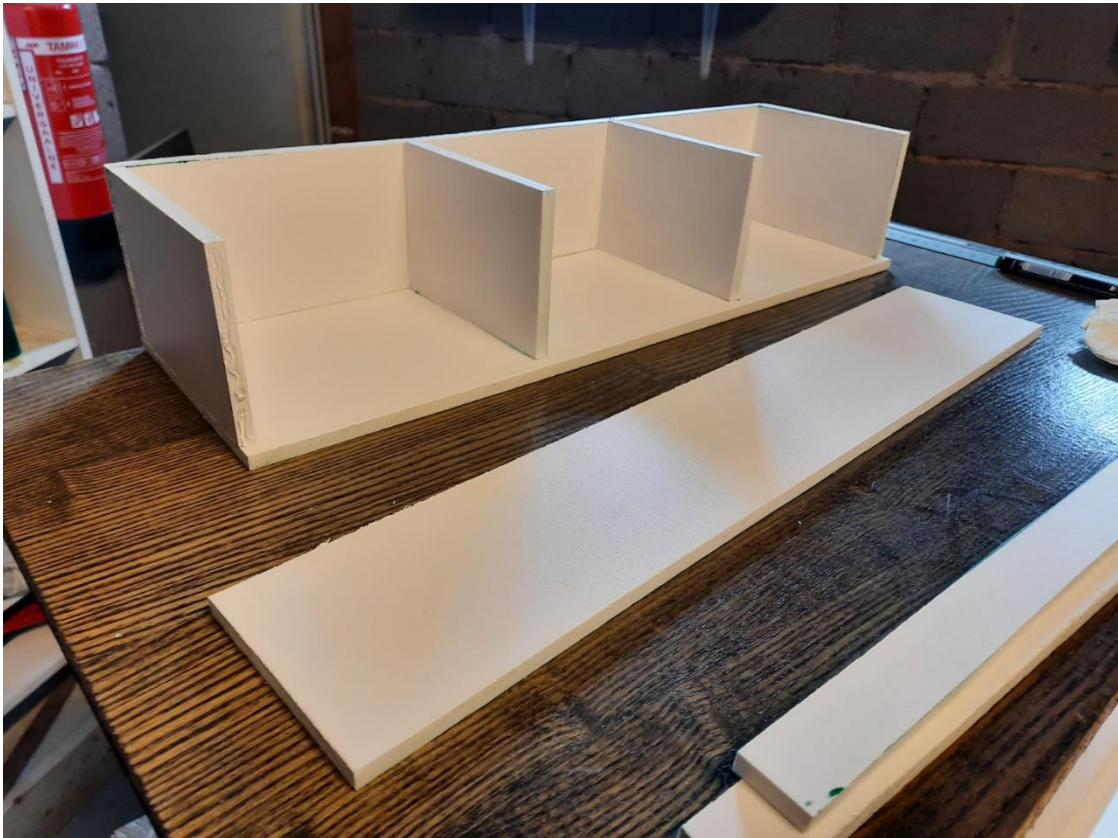


Foto 2.7 Katseseadme materjalisahklite kinnitamine liimimise teel



Foto 2.8 Katseseadme külgraamide ehitus



Foto 2.9 Katseseadme katmine pleksiklaasiga läbi neetimise

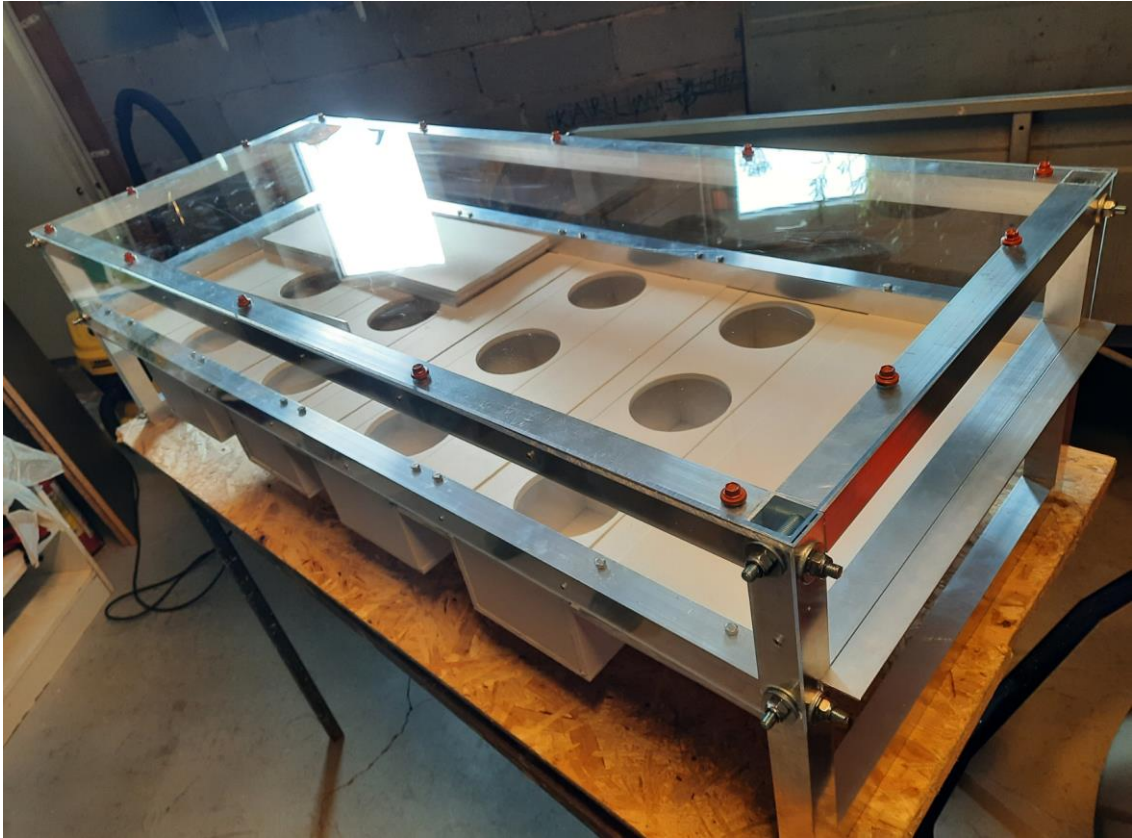


Foto 2.10 Kuivamiskatse masina skeleti ja sahtlite ehituse lõpufaas

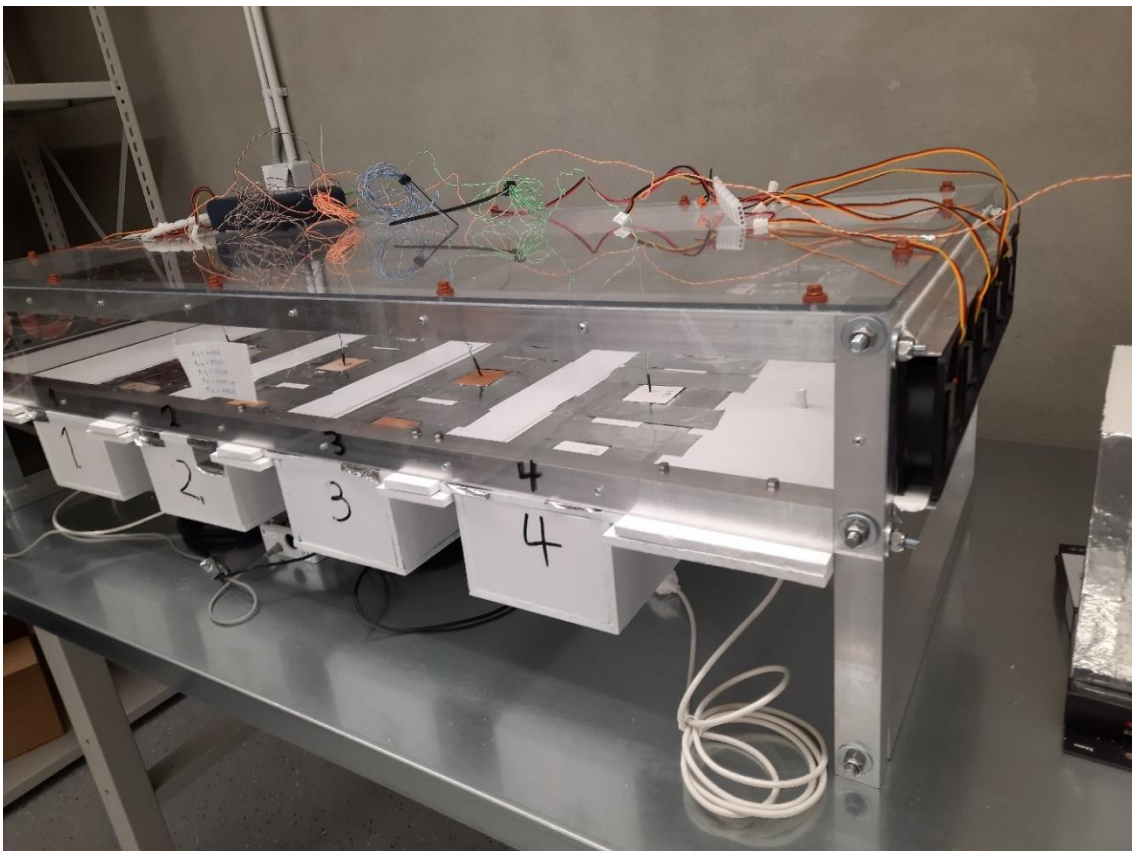


Foto 2.11 Kuivamiskatse käik

2.1.4.2 Katse käik

Katse käigus mõõdetakse materjalide kuivamise kiirust, see tähendab et fikseeritakse katsekeha kaalu muut ajas.

Kõigepealt vaakumküllastatakse katsekehad mõõtmetega 50x50x50 mm. Seejärel võetakse katsekehad eksikaatorist välja, eemaldatakse üleliigne vesi niiske nuustikuga ning fikseeritakse kaal vees ja õhus. Katsekehad isoleeritakse alumiiniumteibiga viielt tahult ning asetatakse katsemasina sahtlisse. Sahtli põhja asetatakse 50 mm paksune EPS plaat ning 3 mm montaaži- ja 1 mm loodimisklotsid, nii et katsekeha ülapind oleks samal tasandil tuuletunneli sisepinnaga. Üleliigsed avad ja pilud kaetakse alumiiniumteibiga ning seejärel lülitatakse ventilaatorid tööle. Kuivamise protsess on intensiivseim alguses ning seetõttu on ülimalt oluline katsekehade regulaarne kaalumine esimestel nädalatel.

Esimesel katsenädalal kaalutakse katsekehi kaks korda päevas, nii hommikul kui õhtul. Teisel nädalal kaalutakse kord päevas ning sellest edasi kord nädalas. Tuleb järgida veesisalduse graafikut katse käigus ja seeläbi korrigeerida kaalumise sagedust, oluline on jäädvustada desorptsiooni ülehügrooskoopse piirkonnas võimalikult palju mõõtepunkte.

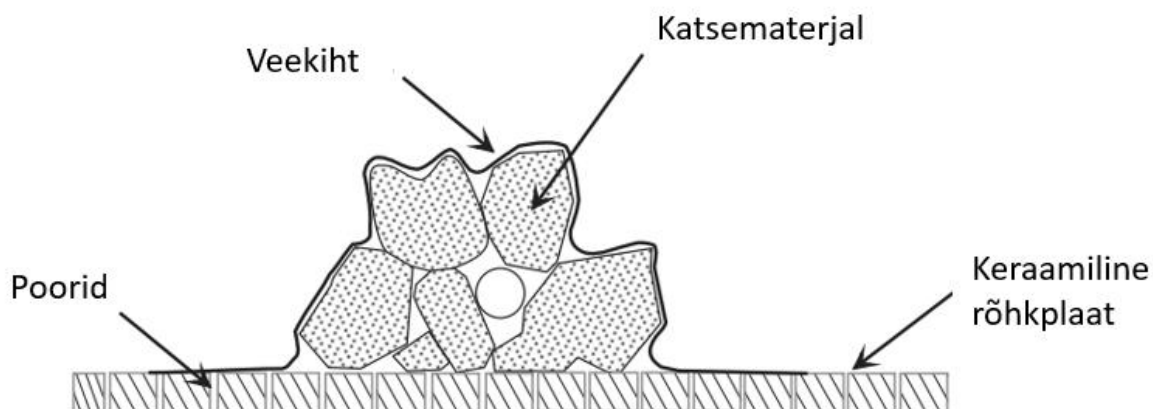
2.1.5 Rõhuplaadikatse

2.1.5.1 Katseseadme kontseptsioon ja kasutamine

Rõhkplaadi katse puhul kasutatakse Soilmoisture pressure plate extractor 1500f2. Seadet kasutatakse levinumalt erinevate pinnaste sorptsioonkõverate määramiseks. Anumas on kolm tasandit, kuhu saab asetada keraamilised poorsed plaadid. Enne esimese plaadi anumasse asetamist peab anuma põhja panema spetsiaalse metallist kolmnurga, mis laseks anumasse tekitatud rõhul plaadi alla minna, vastasel juhul võib alumine plaat murduda rõhkude erinevuse tõttu. On oluline, et vastava rõhutaseme juures kasutatakse vastavaid plaate. See seade on mõeldud kasutamiseks rõhutaseme juures kuni 15 bar [12].

Iga plaadi peale asetakse savikiht, mis tagab hüdraulilise kontakti katsekeha ja plaadi vahel. Ühe plaadi jaoks on soovitatav segada 150g savi 125g destilleeritud veega, seejärel lisada ja segada juurde 75g, 35g, 25g savi. Korruga kogu savikoguse lisades muutub eripind liiga suureks ja vesi ei segune piisavalt saviga. Savikihi peale paigaldada niisutatud eralduskiht, mis laseks vett läbi, aga ei laseks savil katsekehale tungida. Lõpuks suruda katsekehad kangasse, nii et oleks kindel kontakt kogu aluspinnaga. Ühendada väljalaske voolik plaadiga. Seejärel suruda vaheklotsid kangasse ja asetada järgmine plaat anumasse. Kui kõik kolm plaati on paika pandud, võib kaane sulgeda, jälgida et plaadi all olev kummirõngas oleks määritud vaakummäärdega. Kaas suletakse spetsiaalsete kinnititega ja seejärel võib rõhu lasta kambrisse. Väljavoolu voolikud

asetada bürettidesse. Katsekehasid võib lugeda antud rõhutaseme juures tasakaalustunuks, kui bürettidesse ei tule 48 tunni jooksul rohkem vett kui 0,5 ml. Mida suurem on katsekeha kõrgus, seda kauem läheb aega tasakaalu veesisalduse saavutamiseks. Iga uue rõhutaseme korral on soovitatav valmistada rõhuplaatidele uus savi ja katsekehad vaakumküllastada, et säiliks hüdrauliline kontakt [13], [14]. Katseseadmete tervikkomplekti on näha fotol 2.13.



Joonis 2.12 Hüdraulilise kontakti põhimõte. Allikas: [12]



Foto 2.13 Rõhkplaadi katseseadmed

2.1.5.2 Katse käik

Antud töös uuriti kapillaarset sorptsiooni ülehügroskoopes niiskusfaasis pikikiudu puidul, silikaattellisil ja kaltsiumsilikaadil. Kõigepealt valitud katsekehad vaakumküllastati eksikaatoris. Esimeseks rõhutasemeks valiti 0,31 bari ning vastav keraamiline plaat oli sobivaks kasutamiseks rõhutaseme juures kuni 1 bar. Katsetati, kas on erinevus ka savikihi ja katsekeha vahel oleval eralduskangal. Katsetati kolme erinevat filtermaterjali: helkurvest, dressipluusi riidetükk ning kohvifilter. Kuna lämmastikuballoonide rõhutase muutus mitme tunni vältel peale rõhukraani reguleerimist, siis lõplik rõhutase oli 0,39 bari. Esimene katse etapp saavutas tasakaalustunud niiskussisalduse kolme nädalaga. Katsekehade kaalumiseks suleti rõhuballooni kraan, lasti süsteemist ülerõhk välja, avati katseseade ning fikseeriti katsekehade kaal. Selgus, et filterkangastel erinevust tulemuste osas ei olnud. Edasi otsustati kasutada täies plaadi ulatuses ringikujulist filterpaberit optimaalseima lahendusena. Fotodel 2.14-2.16 on näha rõhuplaatide ettevalmistust katsekäiguks.



Foto 2.14 Savialuse valmistamine rõhuplaadile

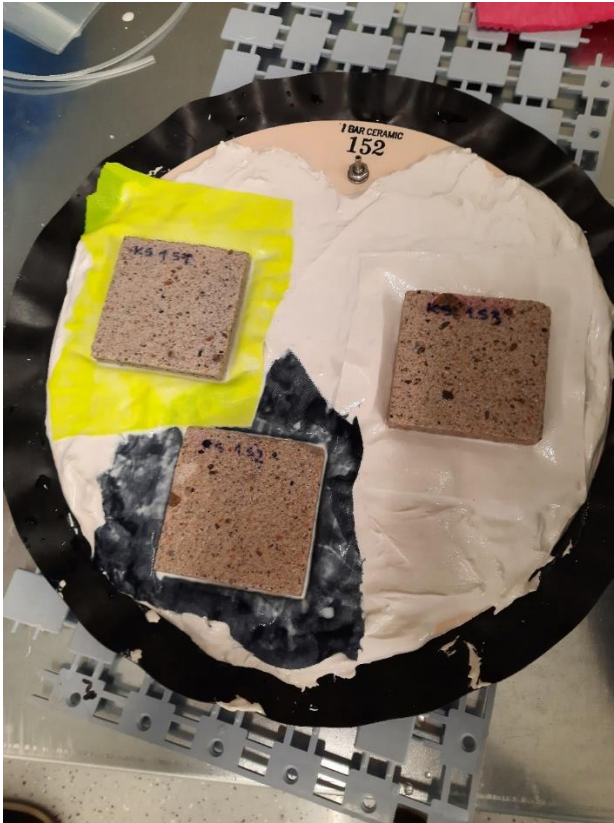


Foto 2.15 Silikaattellise katsekehad erinevatel eralduskihtidel



Foto 2.16 Puitkatsekehad erinevatel eralduskihtidel

Teise etapina oli eesmärk saavutada tasakaaluniiskus 0,9 bari juures. Selleks asetati koheselt peale esimese etapi tulemuste kaalumist katsekehad tagasi rõhuplaatile ning suleti süsteem. Kuna katsekehad olid kuivad, siis saavutati uus tasakaalupunkt üsna ruttu, kahe nädalaga. Katse kaalumistest selgus, et rõhutaseme tõstmise juures puitkatsekehaded ja silikaattellisest vett enam ei eraldunud. Suure tõenäosusega oli hüdrauliline kontakt katkenud katsekeha, savi ja plaadi vahel. Seetõttu korrati uuesti teist etappi. Selleks eemaldati vana savi ja eralduskangas iga rõhkplaadi pealt ning katsekehad vaakumküllastati uuesti. Kuna kitsamad poorid olid endiselt vett täis esimesest vaakumküllastamisest, siis vaheküllastamine toimus oluliselt kiiremini. Selleks asetati katsekehad eksikaatorisse, valati eksikaatorisse destilleeritud vett nii, et katsekehad oleks täielikult vee all, seejärel suleti eksikaatori kaas ja pumbati anumasse vaakum. Vaakumis hoiti katsekehi umbes pool tundi, seejärel lasti normaalrõhk anumasse ning lasti katsekehadel veel pool tundi vee all seista. Seejärel kaaluti katsekehad ning selgus, et saavutati sama veesisaldus, mis esimese vaakumküllastamise puhul. Rõhuplaatiledele segati värske savi ning korrati teist etappi. Eralduskangaks valiti seekord filterpaber (Foto 2.17). Lõplik tasakaalu veesisaldus saavutati rõhutaseme 0,94 bari juures. Tasakaal saavutati kahe nädalaga ning selgus, et katsekehade vaakumküllastamine enne järgmist etappi on olulise mõjuga. Puitkatsekehad olid vahepeal hallitama läinud ning kaalus juurde võtnud (Foto 2.18). Seega tuli järgmise etapi jaoks katsekehad välja vahetada.



Foto 2.17 Kaltsiumsilikaadi katsekehad filterpaberist eralduskihil



Foto 2.18 Hallitavad puitkatsekehad (vasakul) ja hallitav filterpaber (paremal).

Kolmanda etapi puhul võeti uued puidu katsekehad ning need vaakumküllastati eksikaatoris. 1 bari rõhuplaadid asendati 5 bari omadega ning eesmärk oli saavutada tasakaal 3,1 bari juures. Lõplik tasakaal saavutati 3,28 bari juures. Katsekehade väljavõtmisel selgus, et puitkatsekehade peal oli mullitav vesi ning puitkehade peal olid visuaalselt nähtavad ebahürtlased niisked jäljed, mis võib olla tingitud sellest, et puit on heterogeenne materjal ning kiudude paiknemine ei ole igal katsekehal ideaalne antud katse jaoks. Samuti ilmnes koheselt puitkehade kaalumisel, et katsekehade niiskussisaldus on väga erinev ning tulemused ei ole adekvaatsed (Foto 2.19). Kuna

eelnevalt oli ka hallitusega probleeme ja katse kestab väga kaua, otsustati edasi minna viimase etapi juurde ning mitte katsekäiku puiduga korrata.

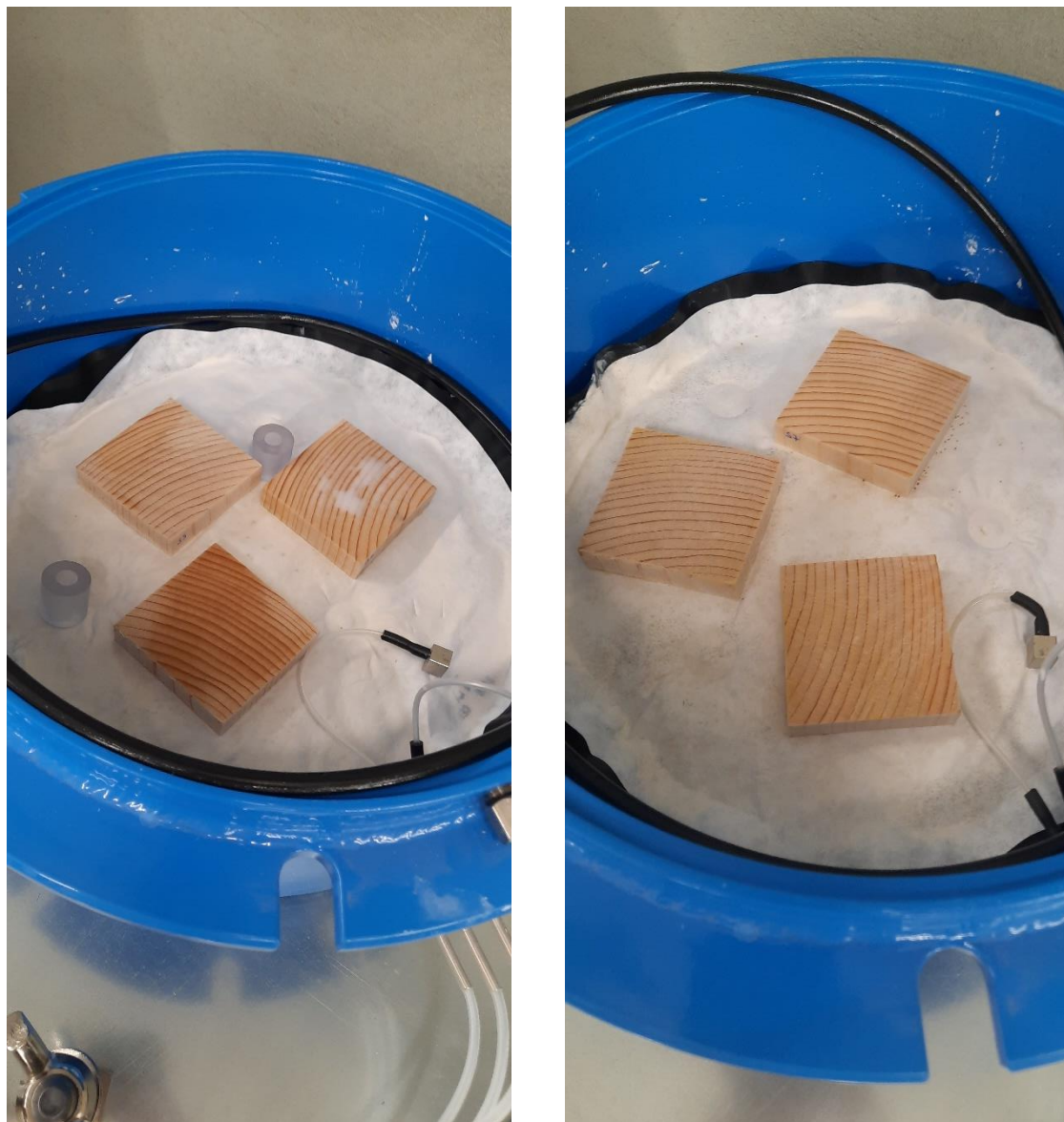


Foto 2.19 Ebähtlaselt niisked puitkatsekehad (vasakul) ja ühtlaselt niisked puitkehad (paremal)

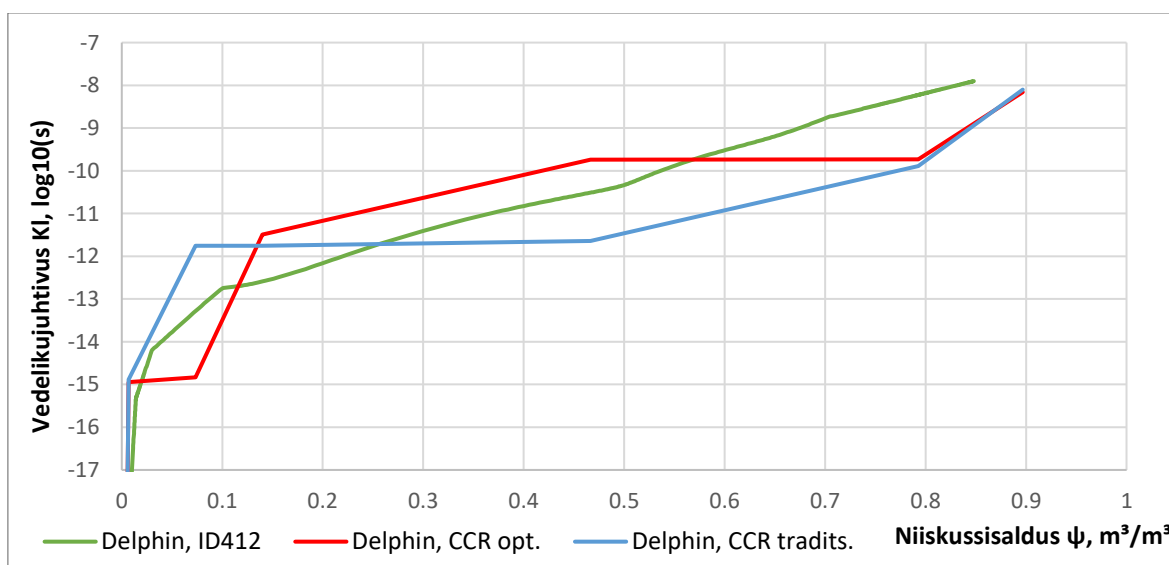
Viimase neljanda etapina oli eesmärk saavutada tasakaal 10 bari juures, selleks võeti kasutusele katseseadme kõige suurema rõhutaseme jaoks mõeldud plaadid, 15 bari plaadid. Lõplik tasakaal saavutati kahe kuu möödumisel rõhutaseme 10,14 bari juures. Samuti võis täheldada, et puitkatsekehade niiskussisaldus erines oluliselt ka viimase etapi juures.

2.2 IBK Delphin

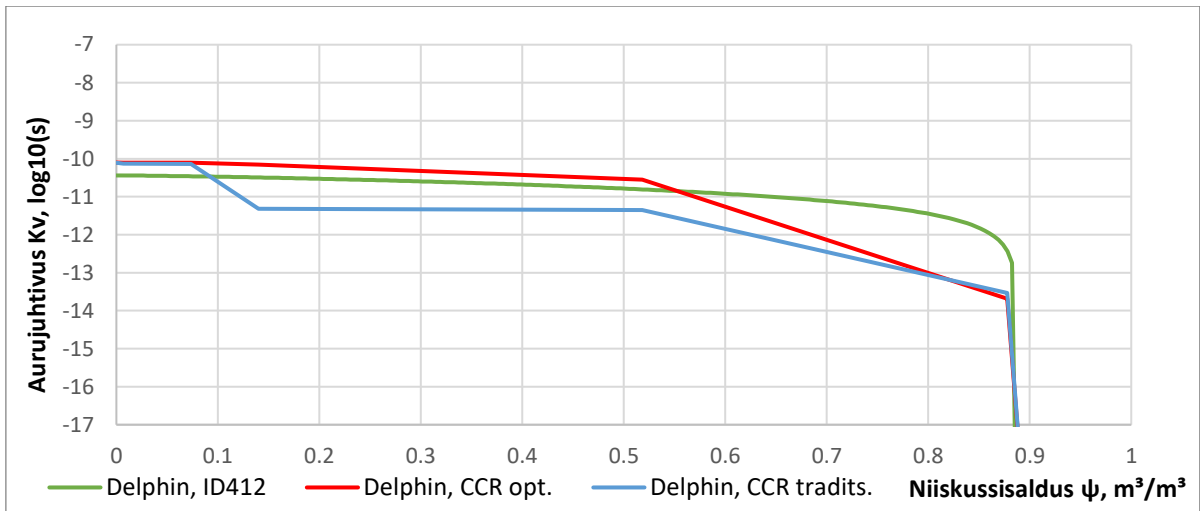
Antud töös imiteeriti katse käiku ka soojus- ja niiskuslevi modelleerimisprogrammiga IBK Delphin. Arvutusmudelid koostati kahe katse puhul: kuivamiskatse ja mitteisotermiline topsikatse. All toodud tabelis (Tabel 2.20) on näha kasutatud materjalifaile ja nende põhiomadusi. Samuti on all graafiliselt välja toodud kasutatud materjalide vedeliku- ja aurujuhtivuse graafikud (Joonised 2.21 - 2.28), mida IBK Delphin arvestab niiskuslevi modelleerimisel. Lisaks Delphinis olemasolevatele materjalifailidele kasutati ka ristikihtpuidu ja kaltsiumsilikaadi puhul varasemalt Tallinna Tehnikaülikooli poolt tehtud faile. Kaltsiumsilikaadi materjalifailide (CCR opt. ja CCR tradits.) olemuse kohta saab lugeda täpsemalt artiklist vt [15].

Tabel 2.20 IBK Delphin materjalifailid ja omadused

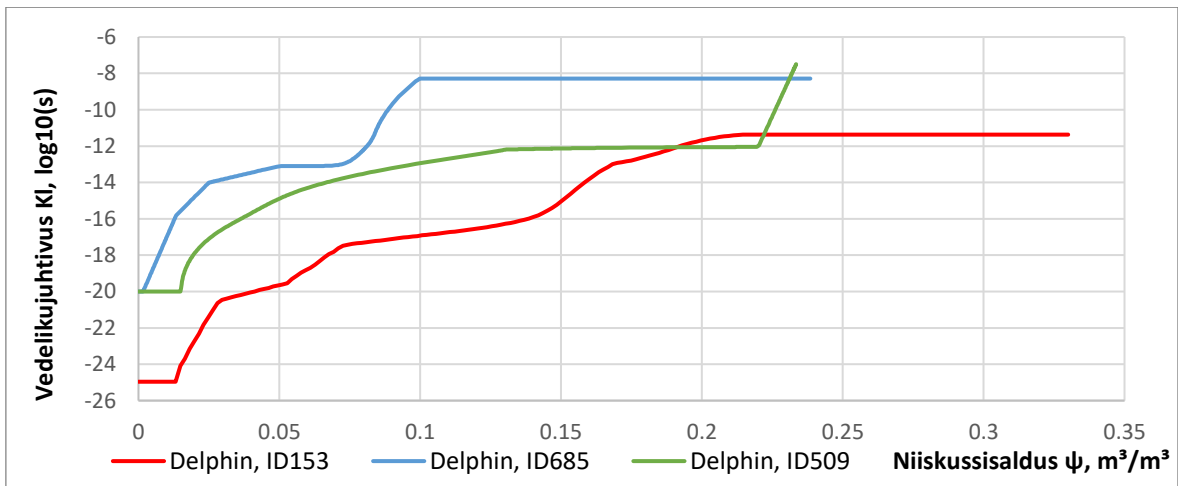
Material ID	Materjali kirjeldus	Difusioonitakistustegur μ , -
459	Kuusk pikikiudu	4.443
714	Mänd pikikiudu	4.541
807	Kuusk pikikiudu	3.498
CLT StoraEnso	CLT, tõusev Kv, ilma Kl	500
CLT StoraEnso	CLT, mõõdukalt tõusev Kv, madal Kl	500
460	Kuusk radiaalsihis ristikiudu	236.2
153	Traditsiooniline silikaattellis	40.0
685	Silikaattellis	18.744
509	Silikaattellis	15.744
412	Kaltsiumsilikaat	5.376
CCR traditional	Kaltsiumsilikaat	2.0
CCR opt.	Kaltsiumsilikaat	2.5



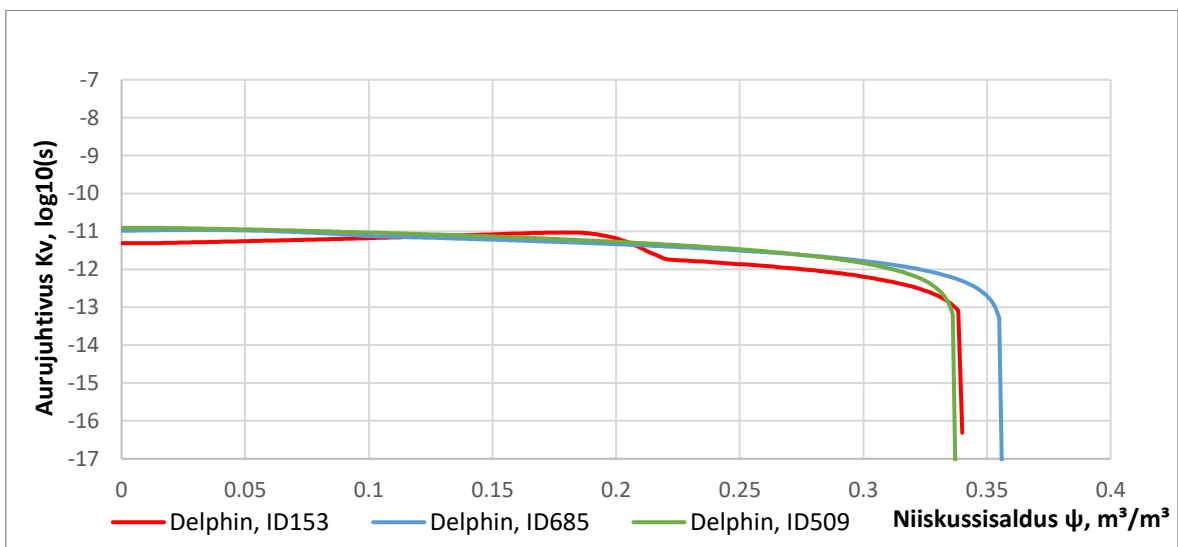
Joonis 2.21 Kaltsiumsilikaadi vedelikujuhtivus



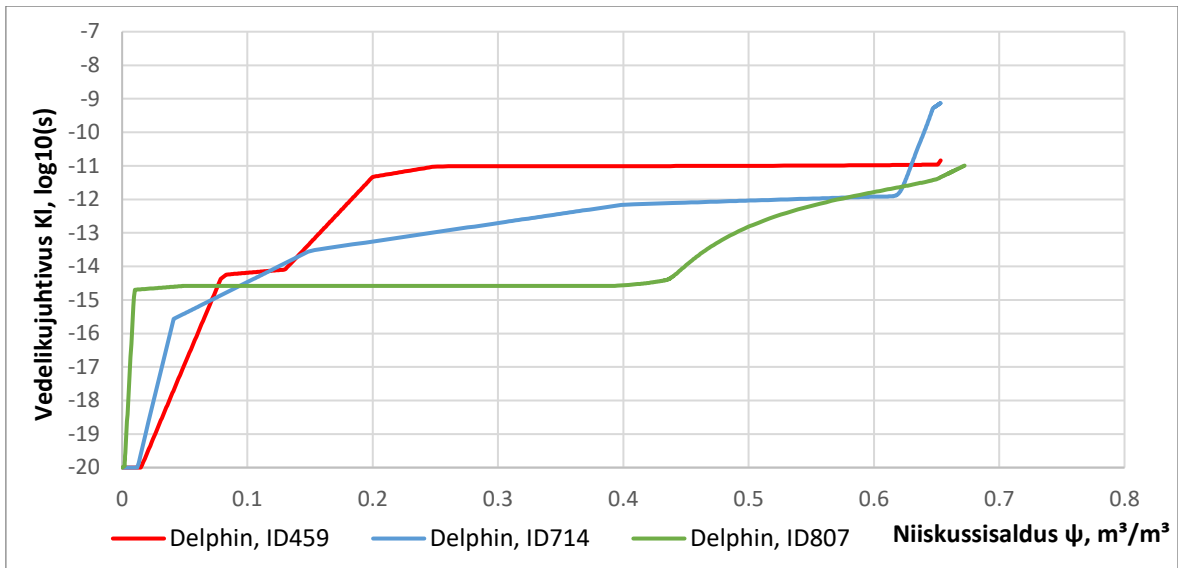
Joonis 2.22 Kaltsiumsilikaadi aurujuhtivus



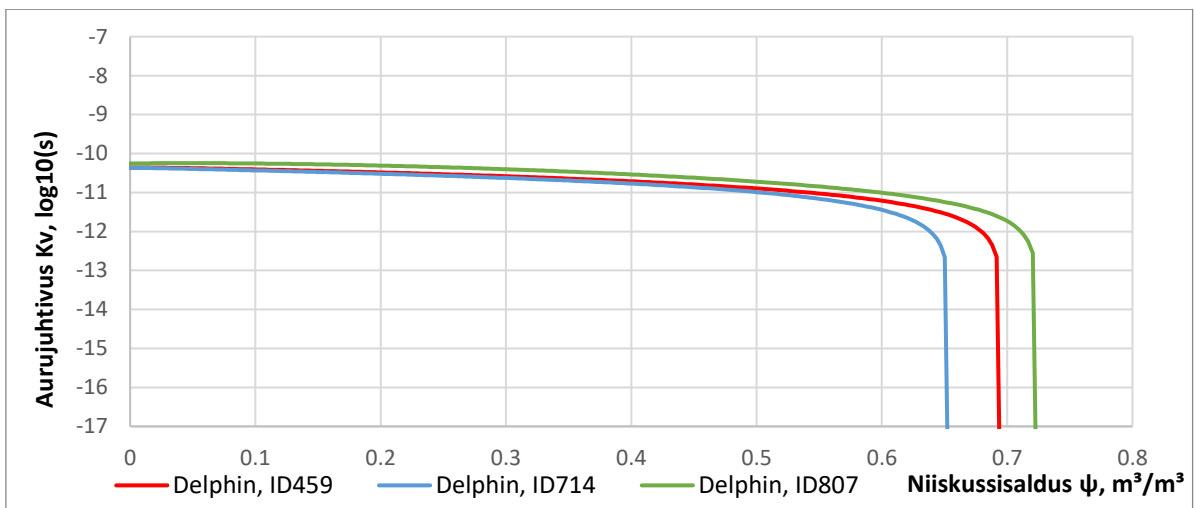
Joonis 2.23 Silikaattellise vedelikujuhtivus



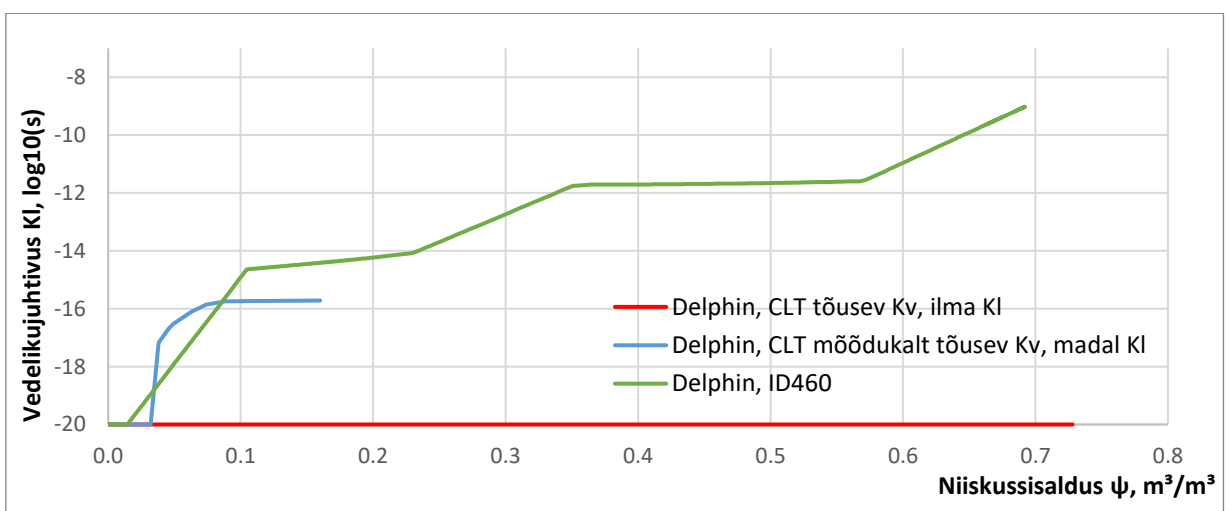
Joonis 2.24 Silikaattellise aurujuhtivus



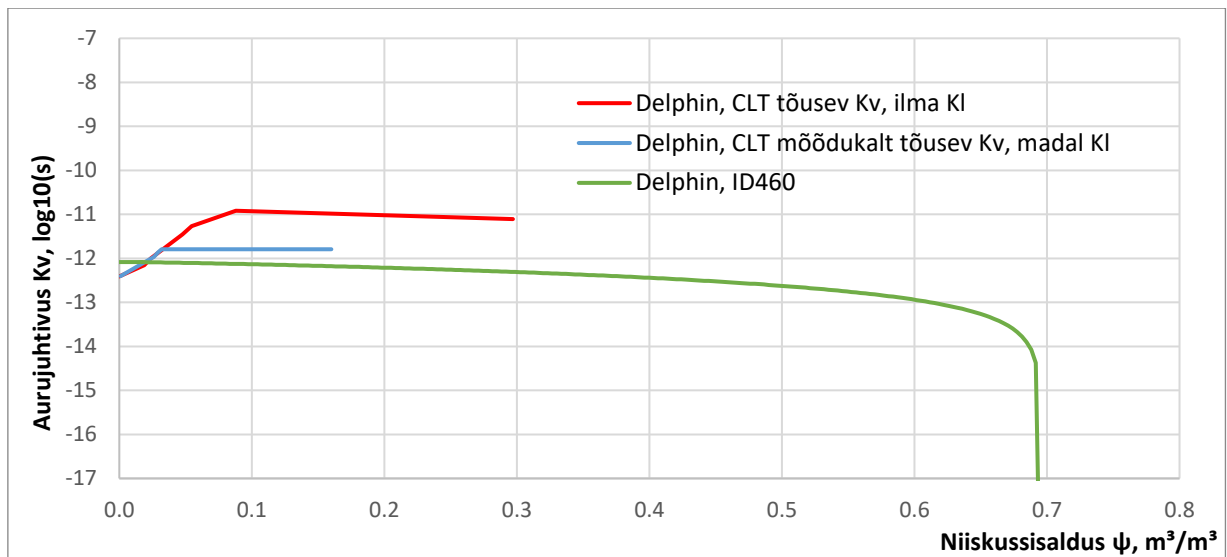
Joonis 2.25 Puidu vedelikujuhtivus pikikiudu



Joonis 2.26 Puidu aurujuhtivus pikikiudu



Joonis 2.27 Puidu vedelikujuhtivus ristikiudu



Joonis 2.28 Puidu aurujuhtivus ristikiudu

Kuivamiskatse puhul modelleeriti kuubik kolmest küljest mõõtudega 50 mm ning määrati niiskuslevi levimiseks vertikaalsuund. Kuna katsekeha on päriselus alumiiniumteibiga muudelt külgedelt isoleeritud, siis eeldame arvutusmudelis, et kuivamine saab toimuda ainult läbi ülemise tahu. Katse vältel üles mõõdistatud keskkonnatingimustest koostati kliimafail, mis pandi ääritingimuste sisendis temperatuuri ja õhuniiskust määrama. Ääritingimuste sisendis arvestati ka vähenenud pinnatakistust ventilaatorite tekitatud õhuvoolu arvelt. Väljundiks uuriti summarset niiskussisaldust simulatsiooni vältel ning samuti ülemise tahu pinnatemperatuuri. Mudel arvutati läbi kõigi tabelis 2.20 toodud materjalifailidega ning saadud andmeid võrreldi hiljem päriskatsega.

Mitteisotermilise topsikatse puhul mudeldati horisontaalsuunas niiskuslevi läbi katsekeha, mille parem pind oli topsi sisekeskkond ja vasak pind toa sisekeskkond. Mõlemal pool on ääritingimusteks mõõdetud kliimafailid. Toapoolsel pinnal arvestatakse ka pinnatakistuse vähenemist. Väljundiks uuritakse niiskusvoogu läbi vasakpoolse pinna ning keskmist suhtelist niiskust katsekehas.

3. Tulemused ja analüüs

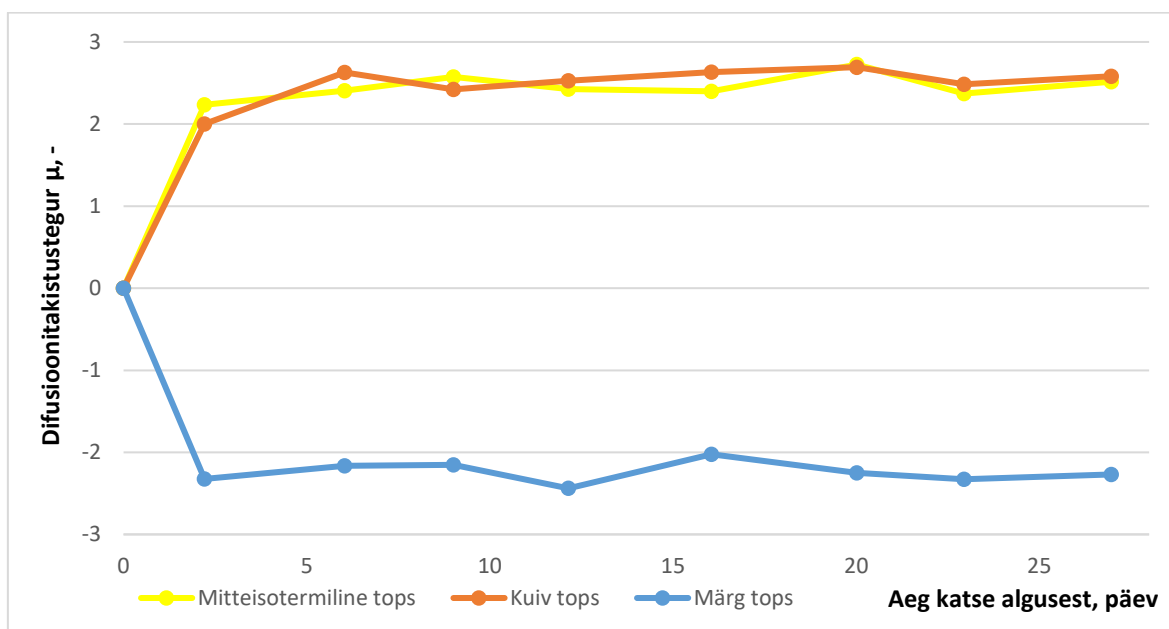
3.1 Isotermiline ja mitteisotermiline topsikatse

Topsikatsete puhul sai difusioonitakistustegur μ arvutatud viiest viimasest kaalumisest leitud massimuutude põhjal. Kuigi standardi ISO 12572:2016 alusel peab ootama, kuni viie viimase kaalumise ükski massimuut ei erine nende keskväärtusest 5% võrra, siis antud töös oli lõpliku difusioonitakistusteguri määramisel hälve kohati suurem. Mida suurem on materjali difusioonitakistus, seda kauem kestab ka katsekeha niiskussisalduse tasakaalustumine. Ristikihti puidu topsikatsete puhul oli kõikumine eriti suur ning adekvaatsema tulemuse saamiseks oleks tulnud oluliselt kauem oodata. Kõikumine võib olla tingitud sellest, et topside kaalumise soojas ja niiskes keskkonnas tekitas kondensaadi külma katsekeha pinnale. Pikikiudu puidu ja kaltsiumsilikaadi difusioonitakistuste puhul märja ja kuiva topsi katse puhul arvestati ka topsis oleva õhukihi veeauru takistavat mõju. Samuti arvestati õhukihi mõju katsekehade keskmise suhtelise niiskuse taseme määramisel. Mitteisotermilised topsid olid varustatud ka topsi sees väikeste ventilaatoritega, mis eemaldas seevastu sisemise õhukihi pinnatakistuse mõju. Mitteisotermilise katse puhul mõõdeti ääretingimusi mõlemal pool katsekeha ning arvutati niiskuslevi ka programmiga IBK Delphin. Topsikatsete katsekäik kestis kokku 27 päeva ning mõõtmisi teostati kaks korda nädalas. Kuigi standard soovitab iga materjali jaoks teha 5 katsekeha, siis antud töö on uurimuslik ning oluline ei ole niivõrd deklareeritud teguri väärtus, kui pigem niiskuslevi käitumise iseloomustamine.

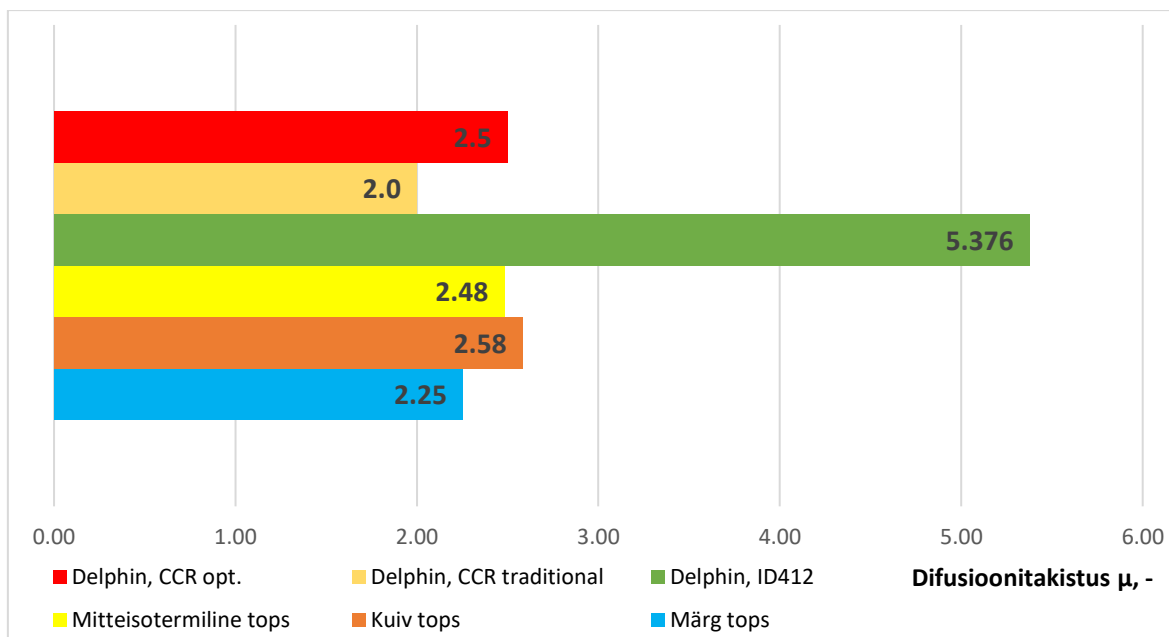
Tabel 3.1 Materjalide difusioonitakistustegurid ja keskkonnatingimused.

Materjal	Topsi tüüp	difusioonitakistus- tegur μ , -	Katsekeha keskmise RH, %	Keskmine temperatuur T, °C
Kaltsiumsilikaat	Mitteisotermiline tops	2.48	68.9	14.9
	Kuiv tops	2.58	30.0	5.5
	Märg tops	2.25	61.2	5.5
Silikaattellis	Mitteisotermiline tops	26.42	68.5	15.8
	Kuiv tops	31.51	27.6	5.5
	Märg tops	27.68	64.9	5.5
Puit pikikiudu	Mitteisotermiline tops	2.08	69.3	15.6
	Kuiv tops	2.09	32.2	5.5
	Märg tops	1.70	57.5	5.5
Puit ristikiudu	Mitteisotermiline tops	65.73	68.8	14.9
	Kuiv tops	165.46	27.4	5.5
	Märg tops	35.95	64.7	5.5

Kaltsiumsilikaadi difusioonitakistusteguri muutumisel ajas (Joonis 3.2) võib täheldada, et esimese nädalaga saavutasid katsekehad tasakaalustunud niiskussisalduse ning edasi oli niiskusvoog stabiilne. Märja topsi veeauru difusioonitakistustegur on graafikus kajastatud negatiivse väärtusena, kuna niiskusvoog on topsist välja ja topsi massimuutus on negatiivne. Kui vaadata lõplikuid μ väärtusi (Joonis 3.3), siis võib täheldada, et kuiva topsi takistus on suurem kui märja topsi takistus. See on tingitud sellest, et märja topsi puhul on katsekeha suhteline niiskus kõrgem ning seetõttu on ka veesisaldus suurem. Kui kuiva topsi puhul toimub kogu niiskuslevi veeauru voo näol, siis märja topsi puhul lisandub ka vedeliku voog. Mitteisotermilise topsi puhul on näha, et difusioonitakistustegur on 0,1 võrra väiksem kuiva topsi katsest tuletatud takistusest. Mitteisotermilise topsi puhul on tegemist sisuliselt märja topsi katsega, ainult erinevus on selles, et erinevate pinnatemperatuuride tõttu on vedelikuvoog vastupidise suunaga. Kui vedeliku juhtivusel oleks piisavalt suur mõju, siis peaks mitteisotermilise topsi puhul olema difusioonitakistus suurem kui kuival topsil, sest vastassuunalise vedela vee voo tõttu peaks summaarne niiskuslevi olema märgatavalt madalam. Vedeliku juhtivusel on hügrokoopsses niiskusvahemikus võrdlemisi väike mõju ning antud hetkel oli katsekeha suhteline niiskus ligikaudu 69%. Seetõttu peaks tulemus olema sarnane pigem märja topsi katsele, kuid kuna katsekeha temperatuur on suurem kui märjal topsil, siis on suurem ka õhu veeaurujuhtivus, millest tulenevalt on suurem ka suhteline difusioonitakistustegur.

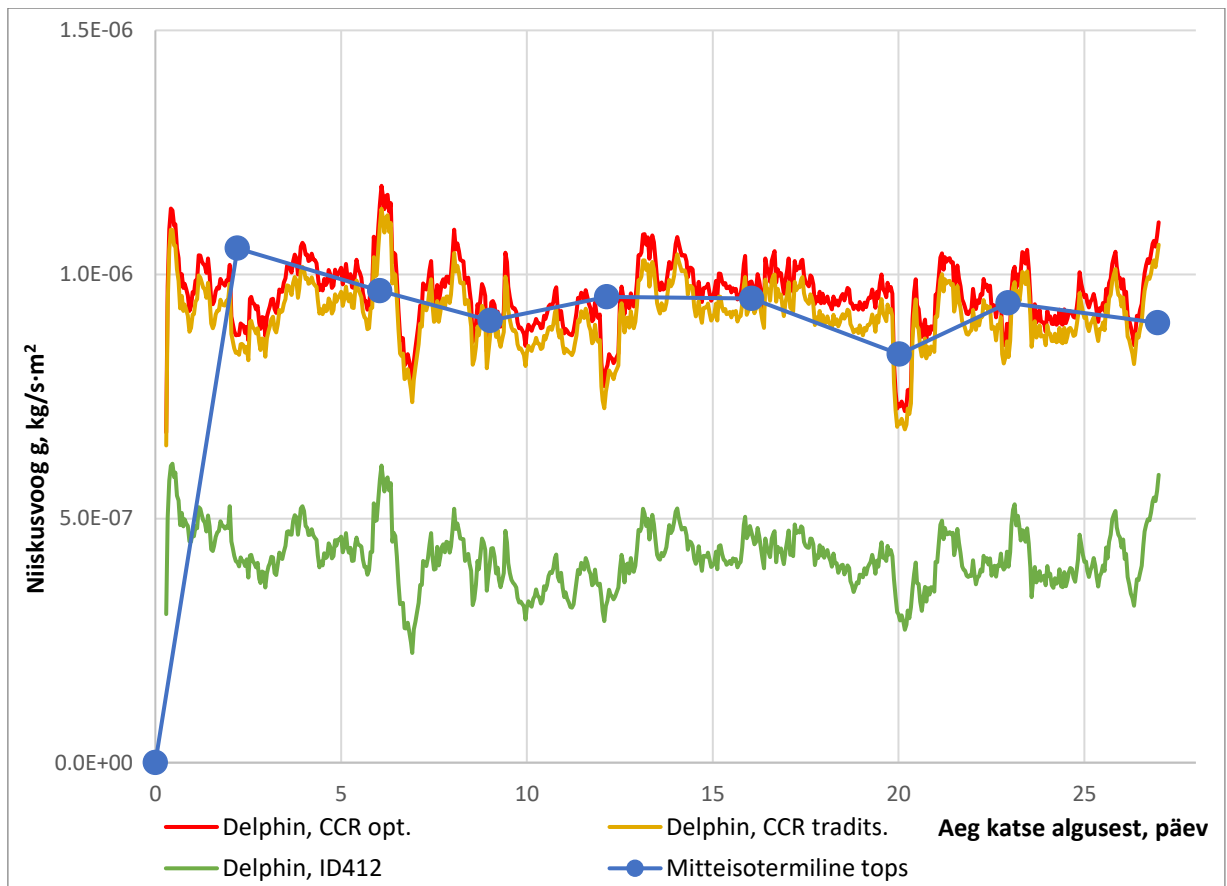


Joonis 3.2 Kaltsiumsilikaadi difusioonitakistustegurid



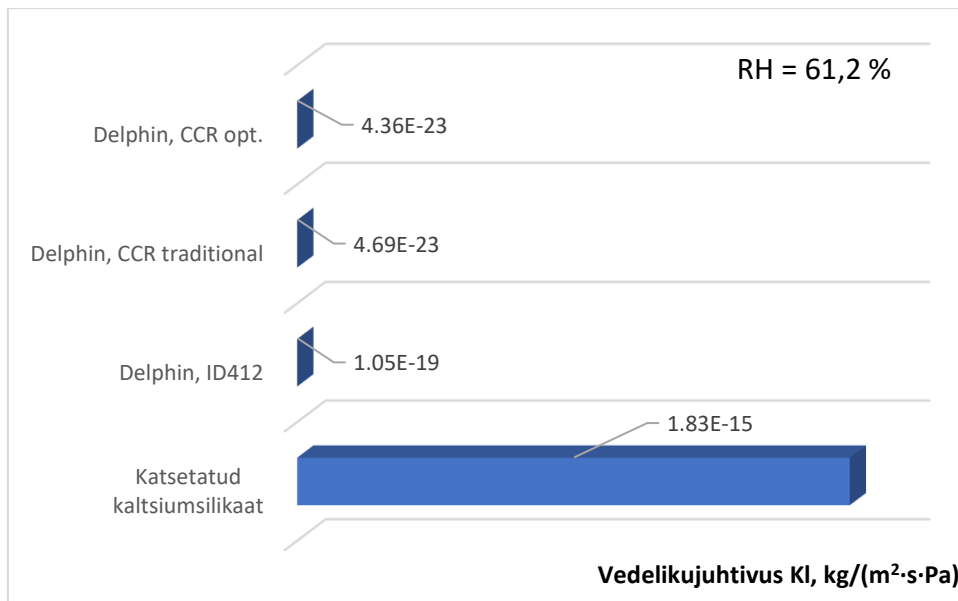
Joonis 3.3 Kaltsiumsilikaadi keskmised difusioonitakistustegurid

Mitteisotermilise topsikatse puhul sai modelleeritud niiskuslevi läbi katsekeha ka Delphiniga. Ääritingimusteks määrati mõõdistatud kliima. Graafikult on näha järsemaid kõikumisi perioodil, mil toimus katsekehade kaalumine (Joonis 3.4). See on tingitud sellest, et katsekehade kaalumiseks avati külmkapp ning kliima taastus alles pooleteise tunni jooksul peale kapi avamist. On näha, et niiskusvoog läbi katsekeha ühtib programmi arvutustes kaltsiumsilikaatidega, millel on sarnasemad difusioonitakistustegurid. Materjalifailil, millel on kaks korda suurem takistus, on ka kaks korda väiksem niiskusvoog.



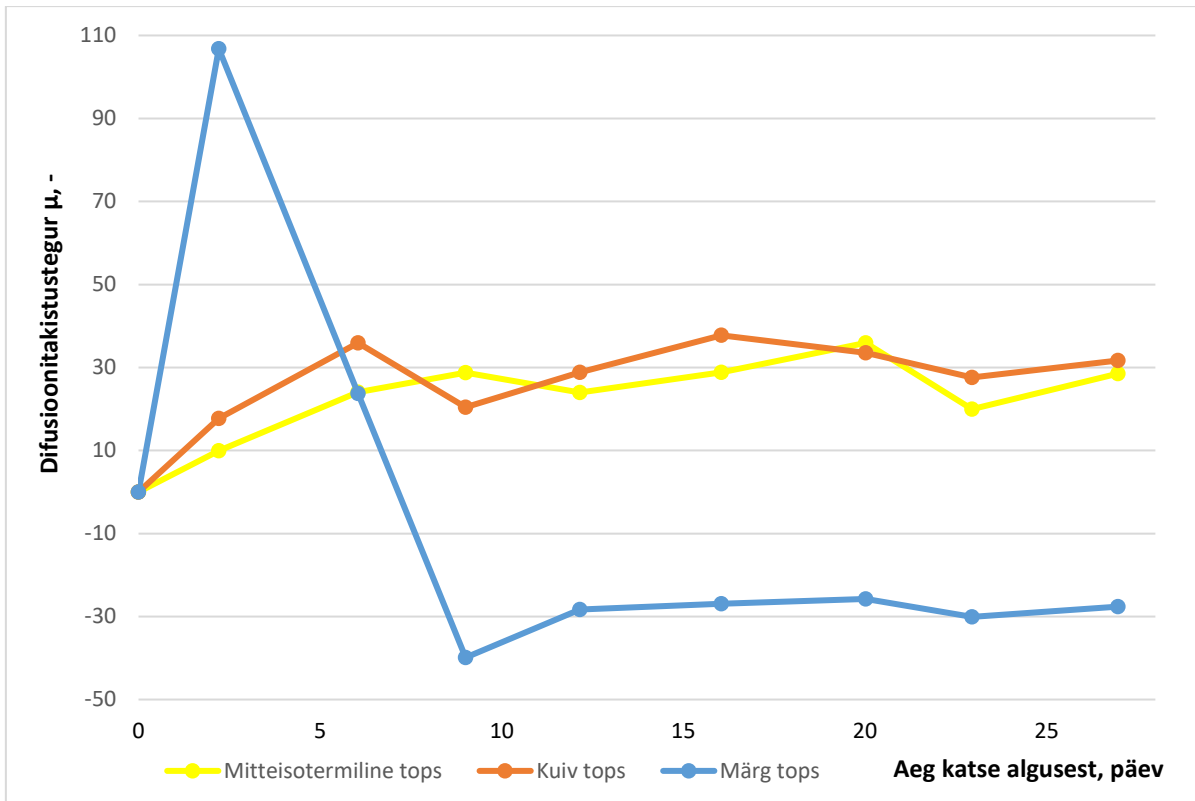
Joonis 3.4 Kaltsiumsilikaadi mitteisotermilise topsikatse niiskusvood

G. Scheffleri käsitleste põhjal peaks materjali veeauru juhtivus olema praktiliselt konstantne niiskussisalduse kasvades ning niiskuslevi intensiivistub ainult kapillaarse vedelikujuhtivuse arvelt. Märja ja kuiva topsi katsest tuletatud difusioonitakistuste vahest sai tuletatud niiskusvoog. Seejärel arvutati suhteline õhuniiskus katsekeha pindadele ning seeläbi leiti kapillaarrõhkude väärtused katsekeha pindadel, mille erinevusest tuletati teoreetiline vedelikujuhtivus (Joonis 3.5). Delphini materjalifailid näitavad, et kapillaarsel vedelikujuhtivusel on oluliselt väiksem mõju sellise suhtelise õhuniiskuse juures. Suurema niiskuslevi antud suhtelise niiskuse juures tingib asjaolu, et materjalifailides on aurujuhtivuse väärtus suurem kui päriselt, kuigi aurujuhtivus programmi failide alusel langeb niiskussisalduse suurenedes. Tegelikult on eeldus vale, ning aurujuhtivus tegelikus suureneb niiskussisalduse kasvades. Seetõttu on ka antud katses märja topsi niiskusvoog suurem, kuna aurujuhtivus suureneb ning vedelikujuhtivusel on tegelikult hoopiski väike mõju katse käigus esinenud niiskussisalduste juures. Vedelikujuhtivuse täheldatav mõju hakkab ilmema alles ülehügrokoopse niiskusvahemikus, mida topsikatsetega on keeruline tekitada.

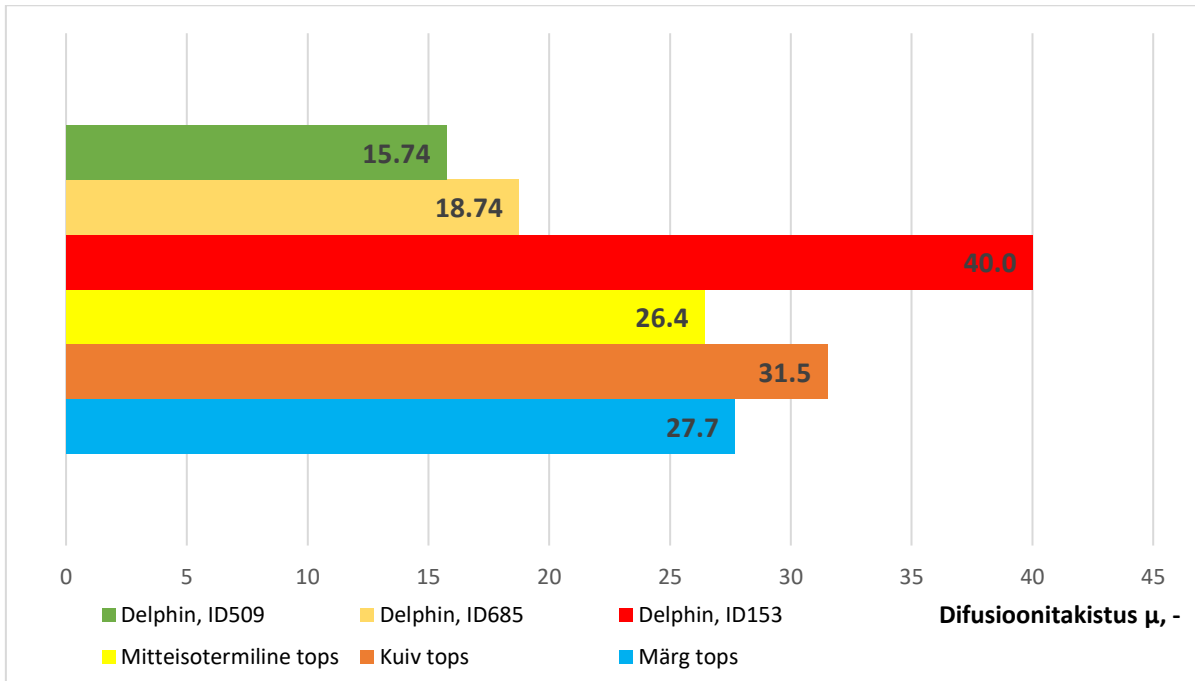


Joonis 3.5 Kaltsiumsilikaadi vedelikujuhtivused

Silikaattellise topsikatsetest ilmneb, et märja topsikatte puhul oli niiskusvoog algul suunaga topsi sisse (Joonis 3.6). See on tingitud sellest, et katsekeha võttis alguses külmkapi sisekeskkonnast niiskust juurde, et katsekeha niiskussisaldus tasakaalustuks antud keskkonnas. Kuna silikaattellise difusioonitakistus on umbes 10 korda suurem kui kaltsiumsilikaadil, siis massimuutused on väiksemad ning protsessid võtavad kauem aega. Silikaattellise puhul on kuiva topsi difusioonitakistustegur 31,5 ning märja topsi takistus 27,7 (Joonis 3.7). Mitteisotermilise topsi difusioonitakistus on 26,4. Kuigi niiskusvoog ei olnud katse lõpetades standardikohaselt stabiliseerunud, on näha, et märja topsi difusioonitakistus on väiksem kui kuival topsil, see tõendab jälle, et niiskuslevi on suurema niiskussisalduse puhul suurem.

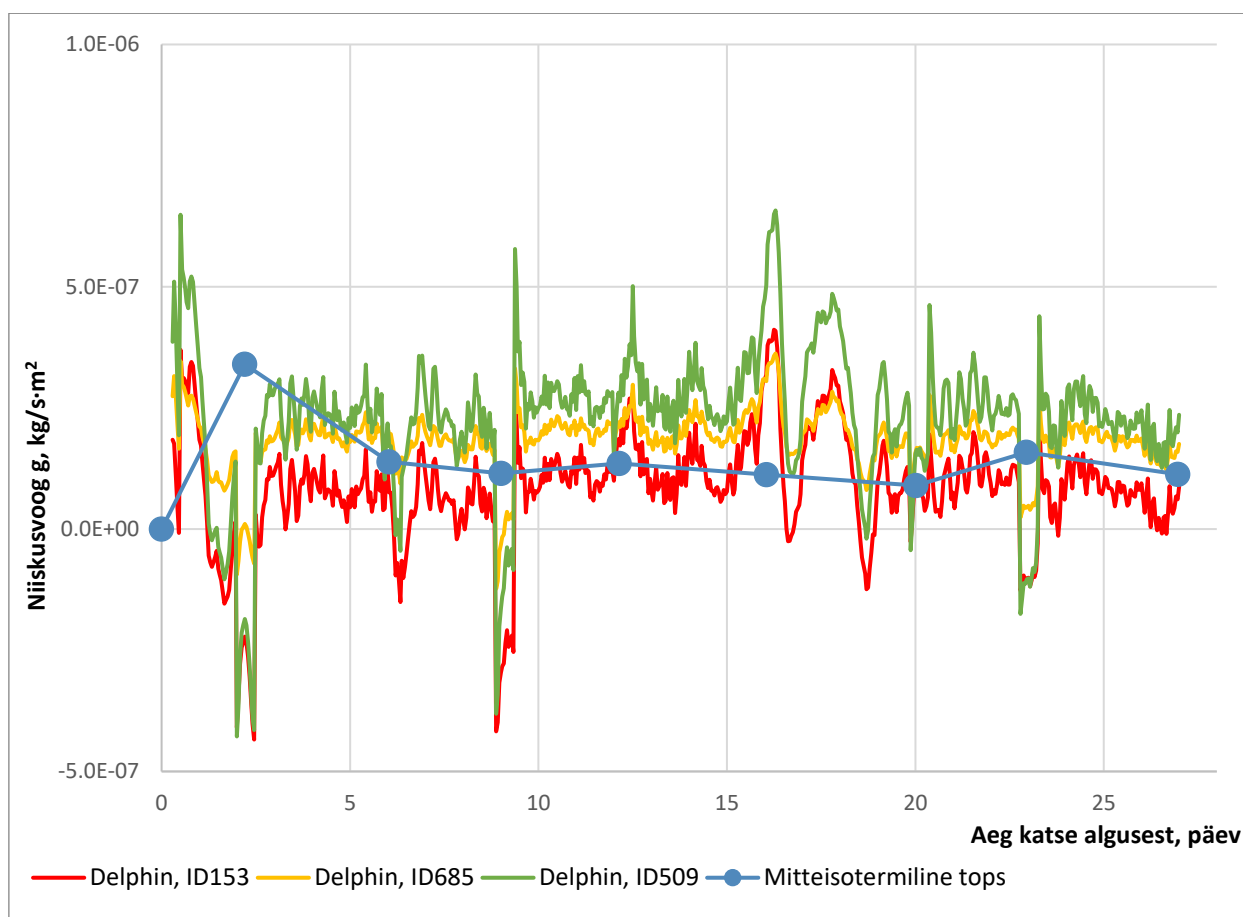


Joonis 3.6 Silikaattellise difusioonitakistustegurid



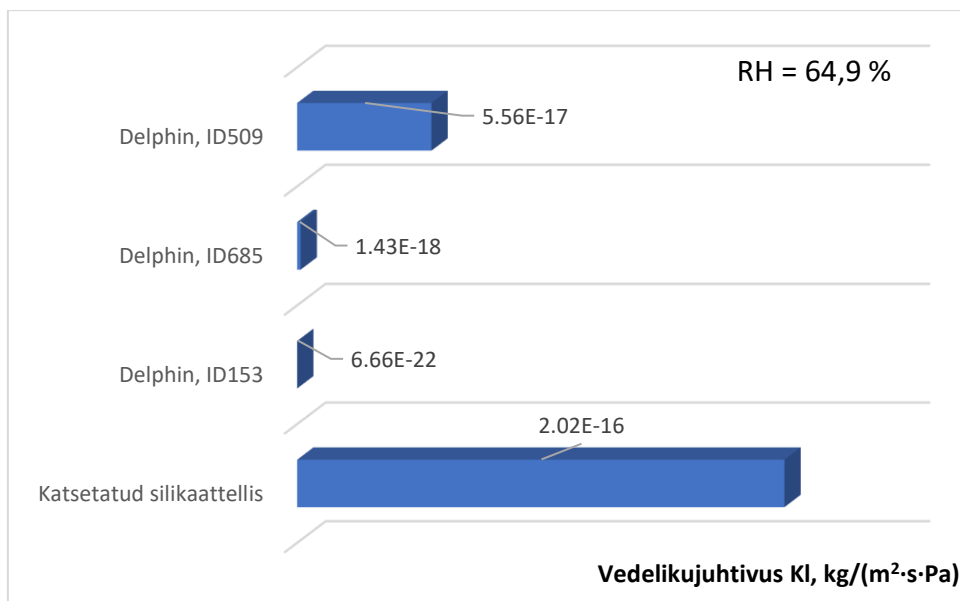
Joonis 3.7 Silikaattellise keskmised difusioonitakistustegurid

Silikaattellise niiskusvoo modelleerimistulemustest on näha, et niiskusvoo intensiivsus on korrelatsioonis suhteliste difusioonitakistusteguritega (Joonis 3.8). Mida suurem on takistus, seda väiksem on niiskusvoog. Siit tuleneb, et silikaattellise kapillaarsel vedelikujuhtivusel on marginaalne mõju hügrokoopse niiskusvahemikus.



Joonis 3.8 Silikaattellise mitteisotermilise topsikatse niiskusvood

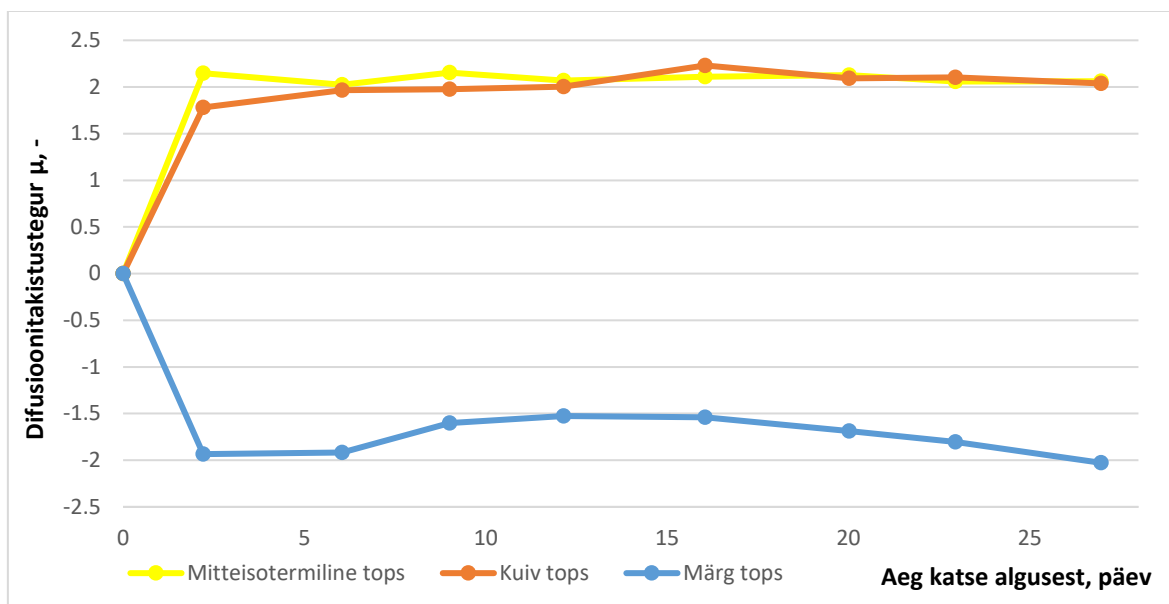
Alloleval diagrammil (Joonis 3.9) on välja toodud märja topsikatse silikaattellise vedelikujuhtivused antud keskkonnatingimuste juures. Katsekeha enda vedelikujuhtivus on tuletatud kuiva ja märja topsi niiskusvoogude erinevusest ning on suure tõenäosusega ülehinnatud. Delphini erinevad materjalifailid näitavad silikaattellisetele kordades madalamaid vedelikujuhtivusi, mis on rohkem tõenäoline antud materjalile 65% suhtelise niiskuse juures.



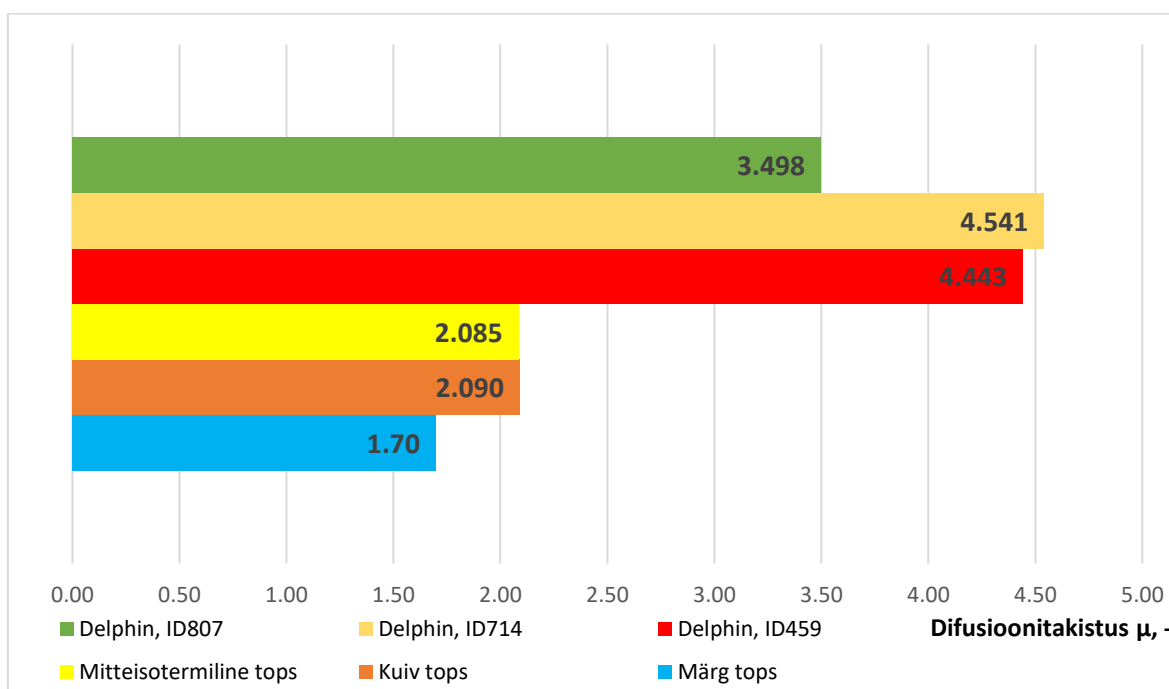
Joonis 3.9 Silikaattellise vedelikujuhtivused

Kui analüüsid pikikiudu puidu difusioonitakistusi (Joonis 3.10), siis mitteisotermiline ja kuiv topsikatse olid ainsad katsekehad, mille viie viimase kaalumise massimuut ei ületanud standardikohaselt lubatavat hälvet. Märja topsikatse puhul on märgata suuremat kõikumist. Kuna niiskusvoog on intsensiivne, siis võis soolalahus hakata lõppfaasis ära kuivama. Antud töös katsetatud materjalides on pikikiudu puidul kõige suurem niiskusjuhtivus. Kui eelnevatel materjalidel sarnanes mitteisotermilise topsikatse difusioonitakistus pigem märja topsikatse tulemusega, siis pikikiudu puidu puhul on näha, et takistus on oluliselt suurem (Joonis 3.11). Niiskemas keskkonnas on materjalil suurem auru- ja vedelikujuhtivus, mitteisotermilisel topsikatsel on auru ja vedeliku voog vastassuunalised, auruvoog suunaga topsi sisse ja vedelikuvoog suunaga topsist välja. Kuna mitteisotermilisel topsikatsel on takistus samaväärne kuiva topsi

katsega, kuigi topsi keskkond on niiskem, siis tähendab see seda, et vedelikujuhtivusel on võrdlemisi suur osakaal.



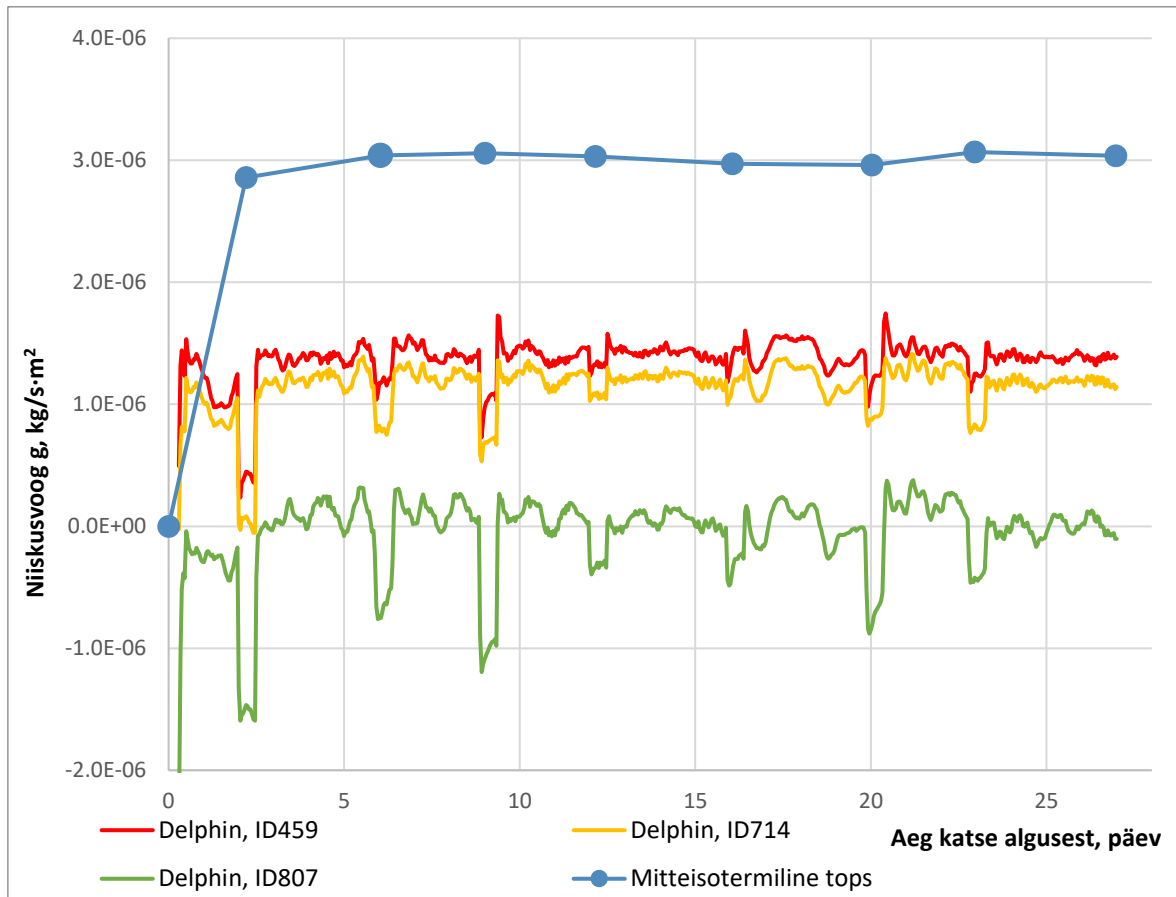
Joonis 3.10 Pikikiudu puidu difusioonitakistustegurid



Joonis 3.11 Pikikiudu puidu keskmised difusioonitakistustegurid

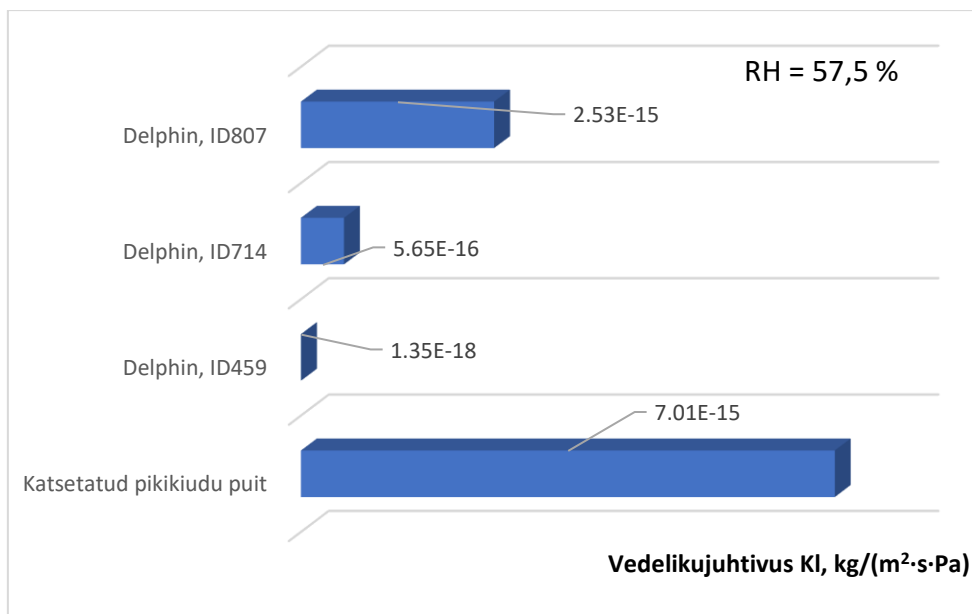
Vaadates mõõdetud ja modelleeritud niiskusvoogu läbi materjali, võib täheldada suuri erinevusi (Joonis 3.12). Puitmaterjalid heterogeensete isotroopiliste materjalidena on omadustelt vägagi erinevad, ning reaalselt olukorda arvutiprogrammis on raske kajastada. Niiskuslevi seisukohalt on üheks peamiseks mõjuriks kiudude paiknemine. Antud katsega võrreldud Delphini materjalidel oli ligi kaks korda suurem

difusioonitakistus. Siiski on näha ID807-l väga madalat ja kohati isegi vastassuunalist summaarset niiskusvoogu, see on tingitud sellest, et materjali puhul eeldatakse väga suure osakaaluga vedelikujuhtivust madalamas suhtelise niiskuse vahemikus.



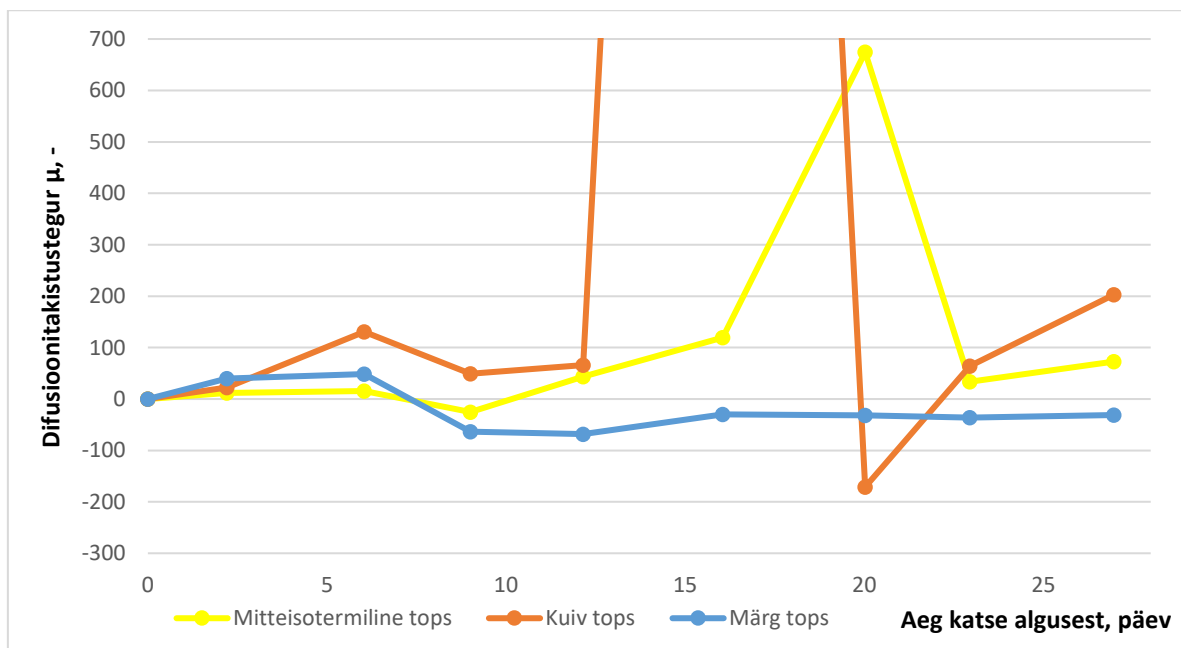
Joonis 3.12 Pikikiudu puidu mitteisotermilise topsikatse niiskusvood

Puitmaterjalidele on iseloomulik suur kapillaarne vedelikujuhtivus madalamas niiskussisalduse vahemikus. Märja ja kuiva topsikatse niiskusvoogude erinevusest tuletatud vedelikujuhtivus ühtib Delphini puitmaterjalide vedelikujuhtivusega enim kõikidest katsetatud materjalidest, kuigi ka antud juhul on vedelikujuhtivus kindlasti oluliselt ülehinnatud (Joonis 3.13). Kui puidu kapillaarne vedelikujuhtivus oleks tõesti niivõrd suur, siis oleks mitteisotermilise topsikatse summaarne niiskusvoog oluliselt madalam.

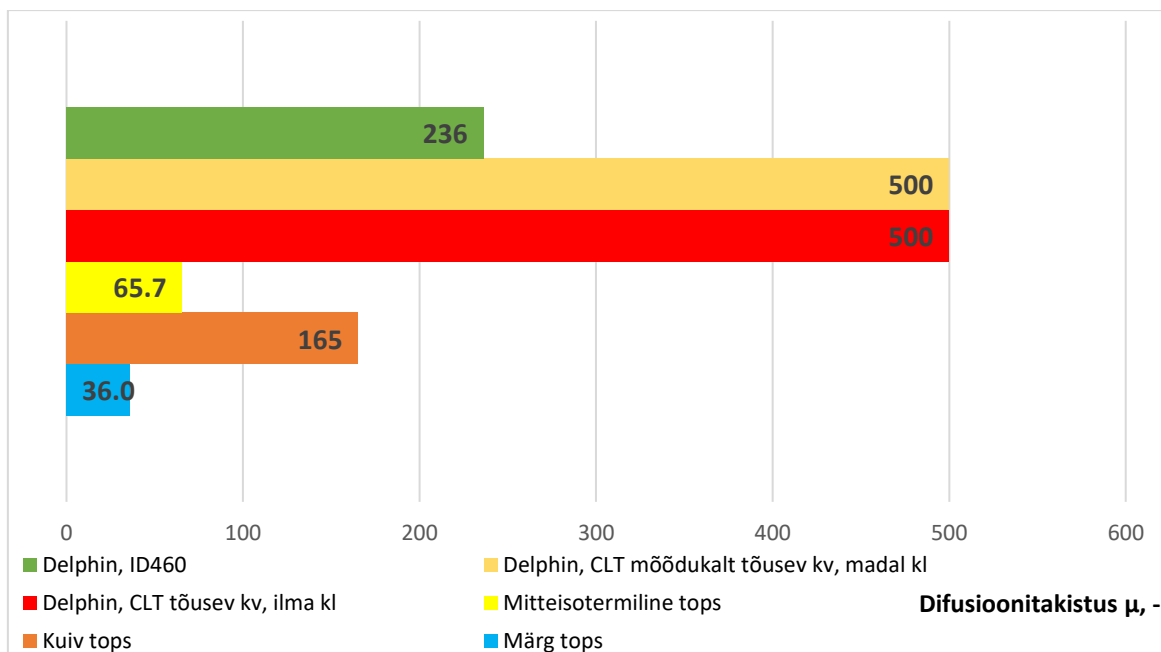


Joonis 3.13 Pikikiudu puidu vedelikjuhtivused

Ristikiudu katsetatud puidu difusioonitakistus on sadakond korda suurem kui pikikiudu puidul ning seetõttu on massimuutused väga aeglased (Joonis 3.14). Ristikiudu puidu puhul oli kindlasti vara katset lõpetada ning saadud tulemused kõige adekvaatsemad ei ole, kuid antud uurimustöö raames sai aeg otsa. Võrreldes Delphini materjalifailide difusioonitakistusteguritega, tulid katseliselt määratud takistused oluliselt madalamad (Joonis 3.15). See võib olla tingitud sellest, et katsekehade kiudude paiknemine ei olnud kõige ideaalsem ristikihti katse jaoks. Kindlasti tuleks puitkehade puhul teha rohkem katseid ja kiudude paiknemise mõju niiskuslevile rohkem analüüsida.

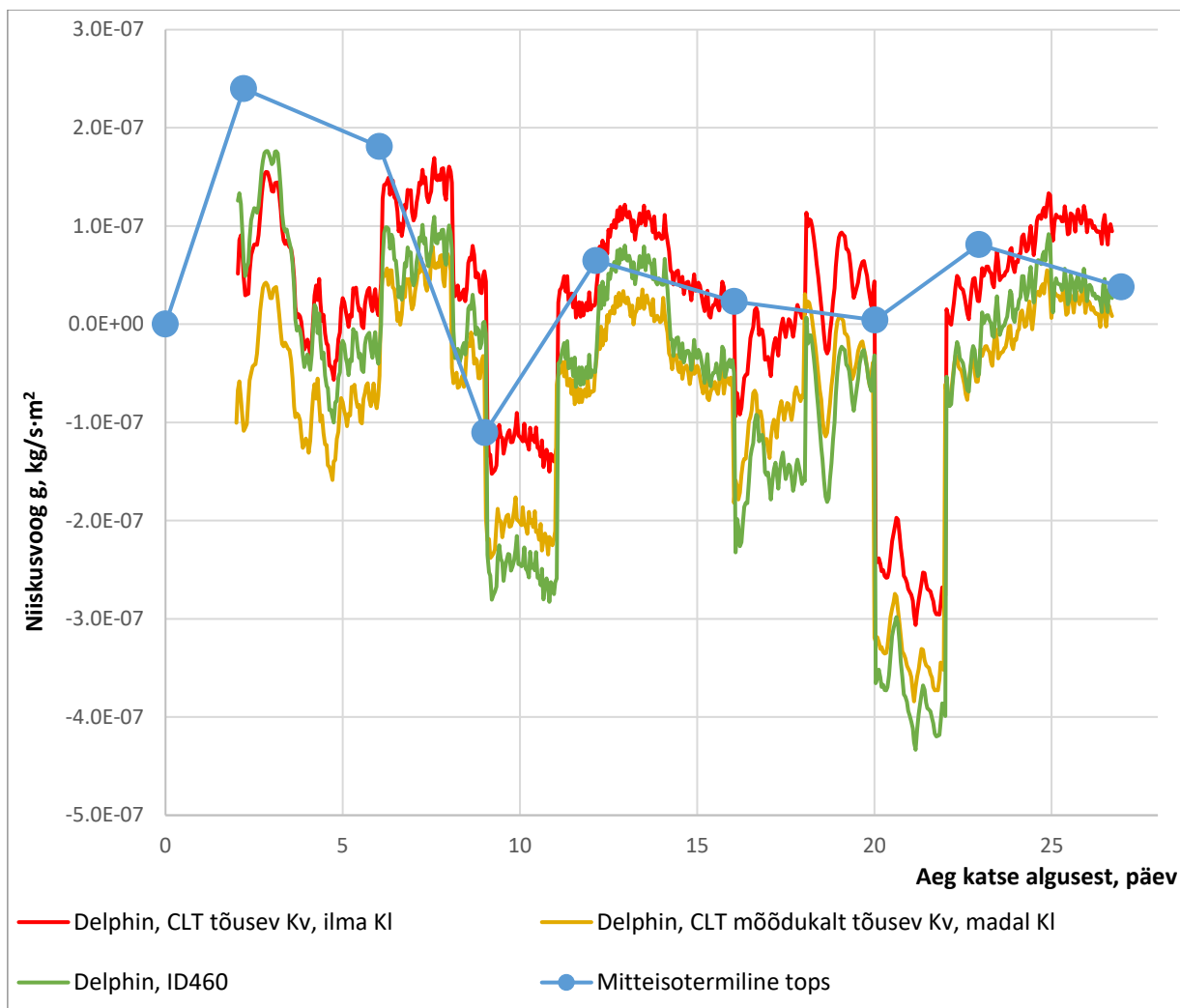


Joonis 3.14 Ristikiudu puidu difusioonitakistustegurid



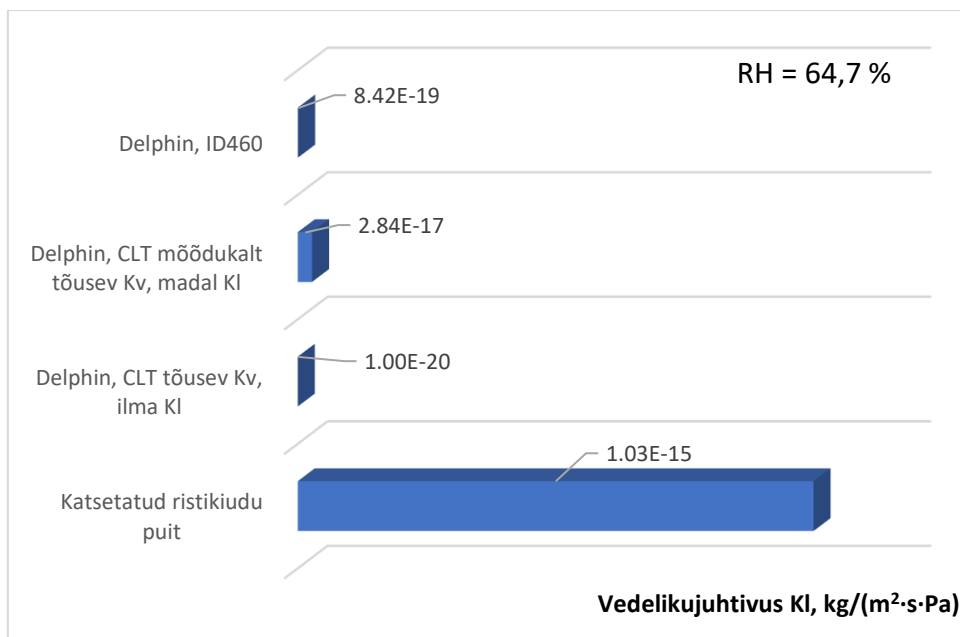
Joonis 3.15 Ristikiudu puidu keskmised difusioonitakistustegurid

Kui analüüsida ristikiudu puidu mitteisoterimise topsikatse niiskusvoogusid, siis on näha, et niiskusvoog on ligikaudu 50 korda väiksem kui pikikiudu katsekehal (Joonis 3.16). Samuti võib täheldada, et vahekaalumisest tingitud keskkonnatingimuste muutumiste mõju niiskusvoole on isegi mitu päeva kestev. Ristikiudu puidul tuleks vahekaalumiste vahelist aega kindlasti pikendada, et vähendada katsekeha ääritingimuste kõikumisest tingitud müra.



Joonis 3.16 Ristikiudu puidu mitteisotermilise topsikatse niiskusvood

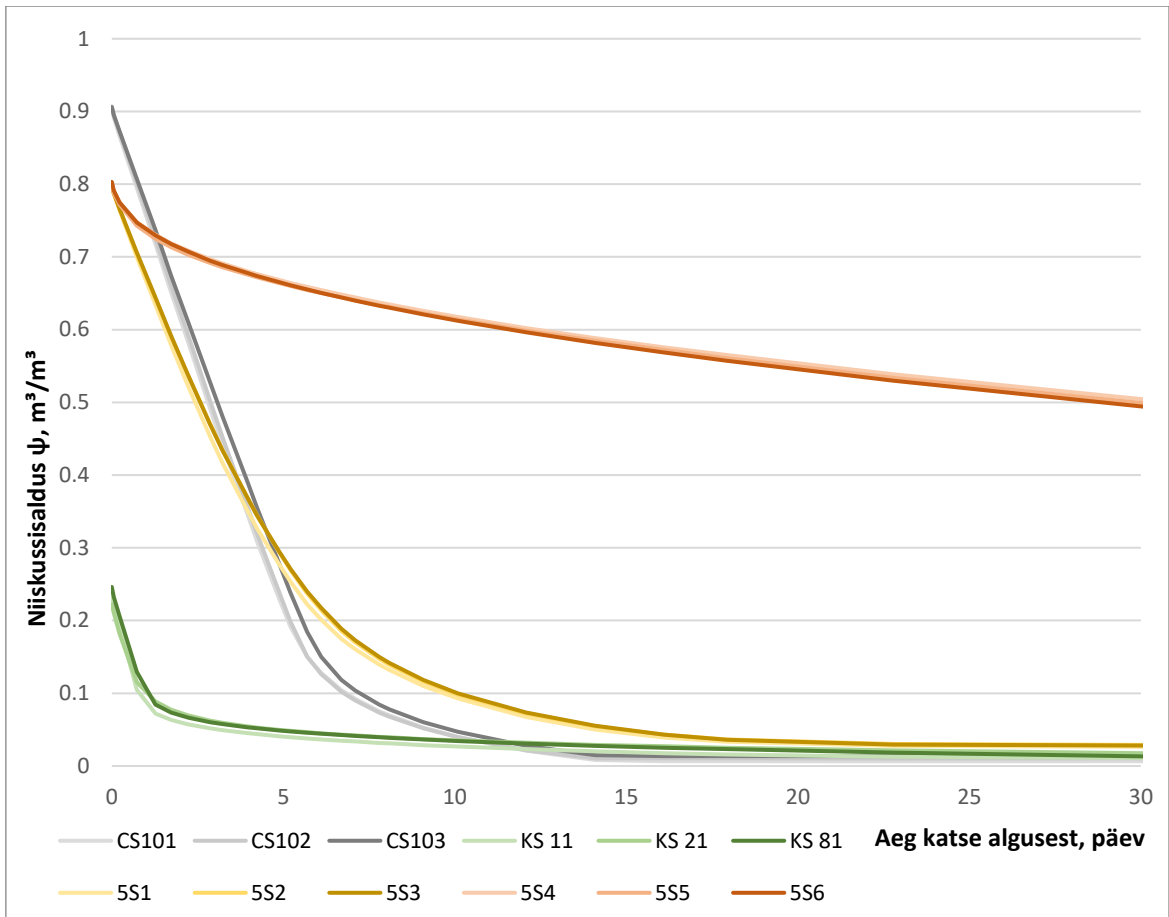
Ristikihti puidu puhul märja ja kuiva topsikatse niiskusvoogude erinevusest tuletatud vedelikujuhtivus on kindlasti ülehinnatud (Joonis 3.17). Kuna antud katsetopside vood ei olnud ühtlustunud, võib arvata, et antud hetkel diagrammis kajastatud vedelikujuhtivus ei pruugi tegelikult isegi aurujuhtivuse muuduna hetkel kajastuda. Tuleks teha rohkem katseid rohkemate ristikihti puidu katsekehadega, et saada usaldusväärsemaid andmeid. Üldiselt on varasemast teada, et puidu vedelikujuhtivus ristikiudu on nii madal, et võib praktiliselt nimetada seda olematuks.



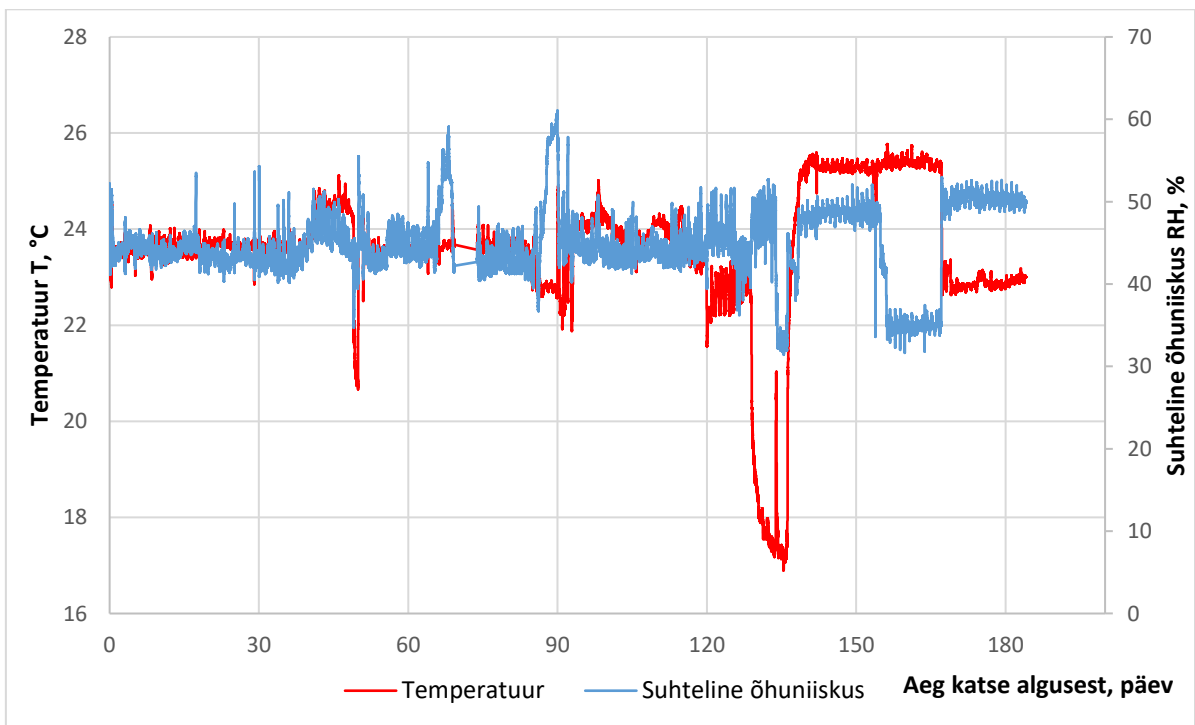
Joonis 3.17 Ristikiudu puidu vedelikujuhtivused

3.2 Kuivamiskatse

Antud katses uuriti eksikaatoris vaakumküllastatud katsekehade väljakuivamise kiirust. Katses osales iga nelja materjali puhul kolm katsekeha. Millest CS101, CS102, CS103 olid kaltsiumsilikaat, KS 11, KS 21, KS 81 silikaattellised, 5S1, 5S2, 5S3 puit kuivamissuunaga pikikiudu ja 5S4, 5S5, 5S6 puit kuivamissuunaga ristikiudu. Selgus, et kõik katsekehad olid saavutanud tasakaalustunud niiskussisalduse umbes 30 päeva vältel, ainult ristikiudu puidu kuivamine kestis oluliselt kauem (Joonis 3.18). Katse algas 11. mai 2021 15:30 ja loeti lõppenuks viimase kaalumisega 4. novembril 2021 14:00. Esimesed 30 päeva suudeti kliimakambris tagada võrdlemisi konstante kliima, keskmiste väärtustega 23,6 °C õhutemperatuuri ja 43,8% suhtelist õhuniiskust. Suve lõpus ja varasügisel toimusid õppehoones ehitustööd, mistõttu esines olulisi kõikumisi. Kuna ristikiudu puidu kuivamine toimus sel perioodil juba niivõrd aeglaselt, siis selline kõikumine tulemusi praktiliselt ei mõjutanud. Terve katseperioodi keskmine õhutemperatuur oli 23,6 °C ja keskmine õhuniiskus 44,9% (Joonis 3.19). Ventilaatorite poolt tekitatud õhuvoolukiirus oli ligikaudu 0,85 m/s. IBK Delphinis arvutusmudeli koostamisel arvestati mõõdetud ääritingimusi.

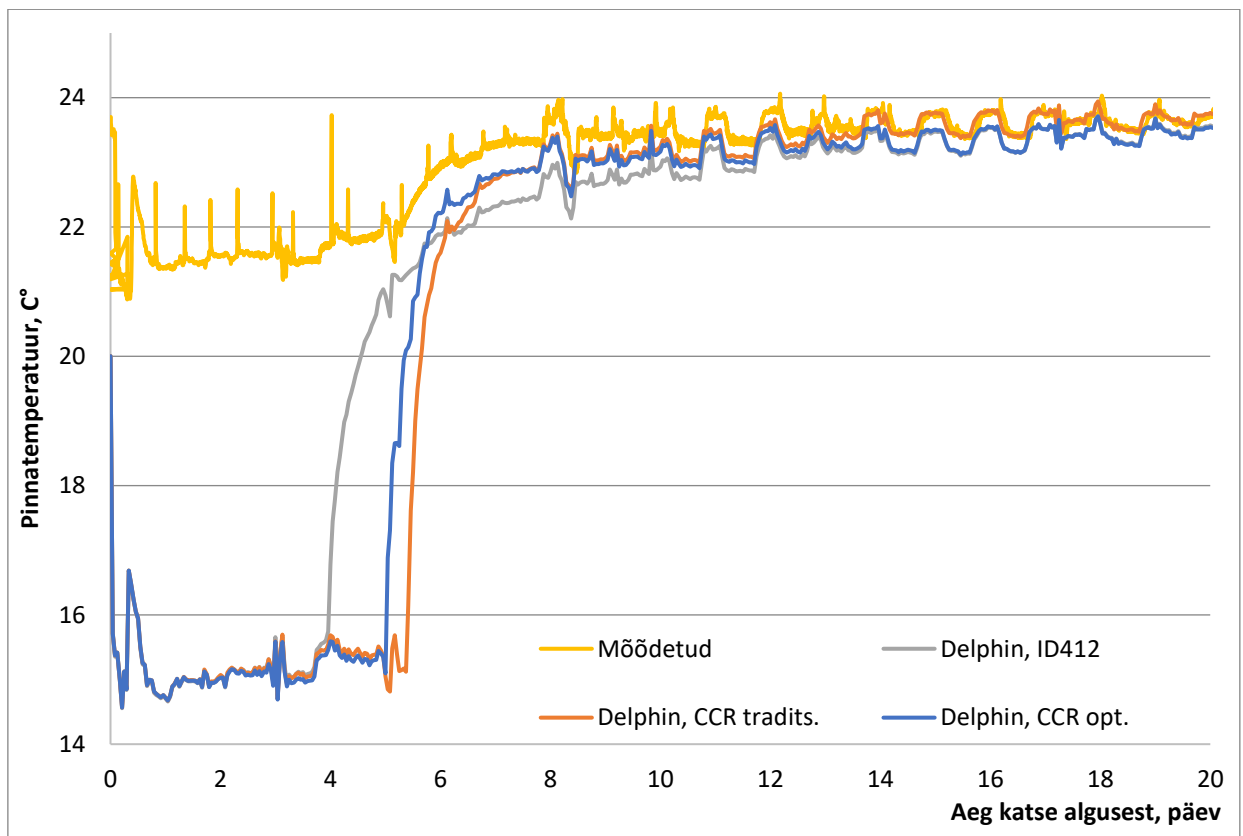


Joonis 3.18 Niiskussisalduse muutus ajas mahu järgi, kõik katsekehad



Joonis 3.19 Kuivamiskatse mõõdetud kliimatingimused katse vältel

Fikseeriti ka pinnatemperatuuri ning hilisemal modelleerimisel selgus, et perioodil, mil toimub intensiivseim väljakuivamine ja domineerib täielikult vedelikujuhtivus aurujuhtivust, on pinnatemperatuur madalam (Joonis 3.20). See on tingitud sellest, et vee aurustumine on endotermiline protsess. Esimese kuue päeva jooksul eraldus kaltsiumsilikaadi pinnale vedelal kujul vesi materjali seest, vee aurustumise protsess pinnalt oli aeglasem kui vee pinnale eraldumise protsess ning seeläbi kattis perioodi jooksul katsekehi vedel vesi, mis tingis madalama pinnatemperatuuri. Allolevalt graafikult on näha, et mõõdetud temperatuur oli oluliselt kõrgem kui arvutusmudeliga leitud temperatuur. See on tingitud sellest, et temperatuuri andurid on ümara kujuga ning toetuvad katsekeha pinnale, tänu arvestatavale õhuvoolule on ka pinnatakistus väiksem kui muidu ning andur ei mõõda tõenäoliselt täielikult katsekeha pinda (Foto 3.21). Ilmselt oleks pidanud temperatuurianduri mõne millimeetri võrra katsekeha ülapinda süvistama.



Joonis 3.20 Kaltsiumsilikaadi pinnatemperatuur väljakuivamisel

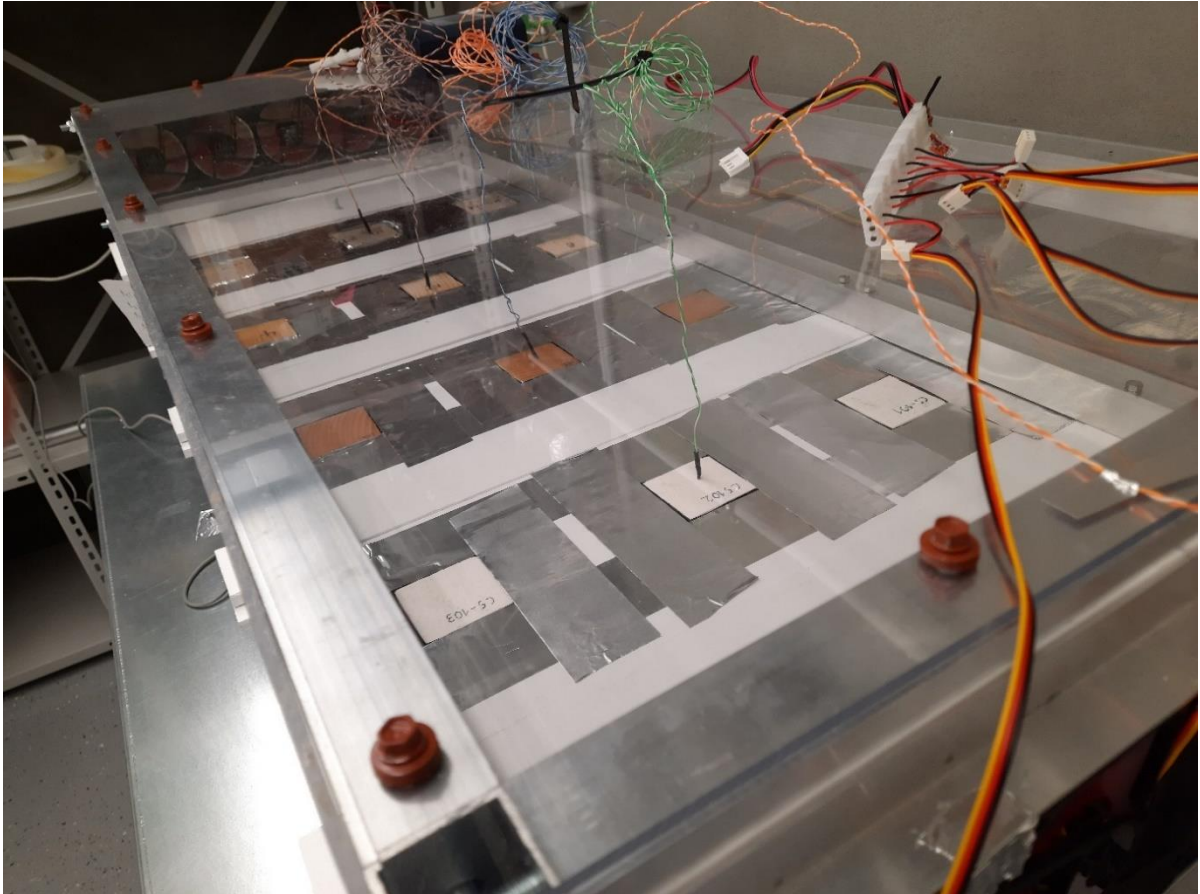
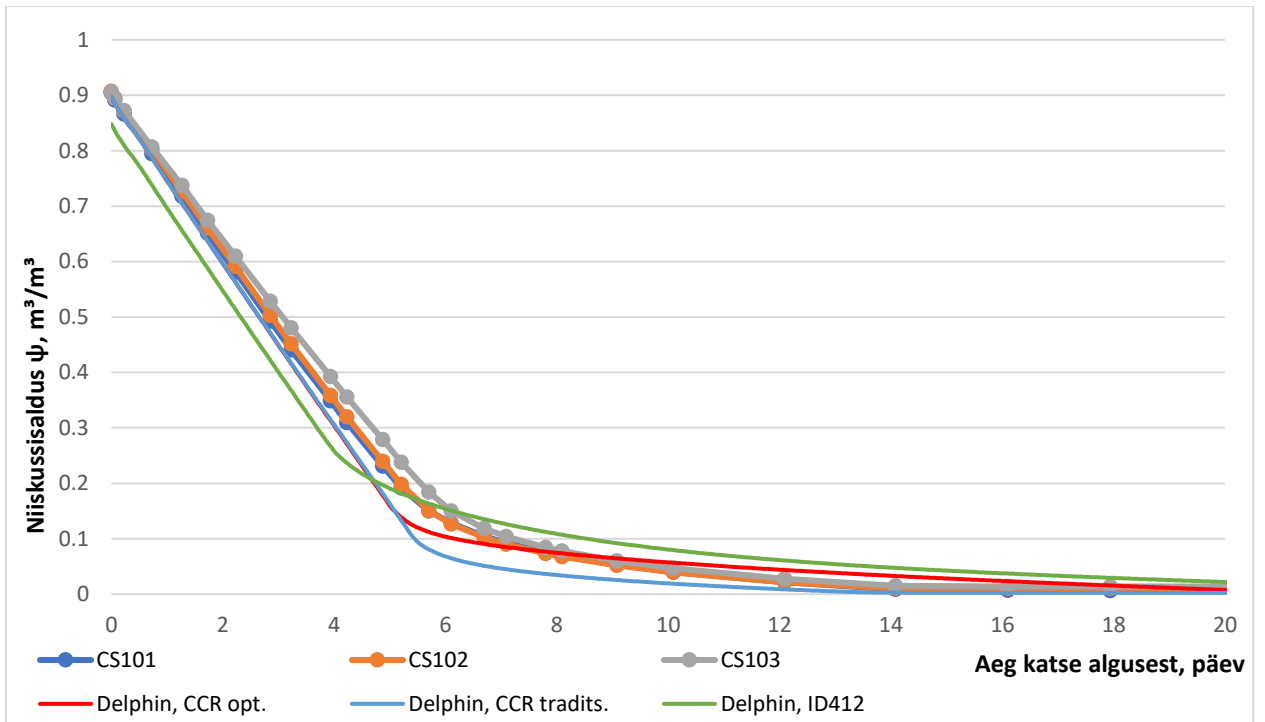
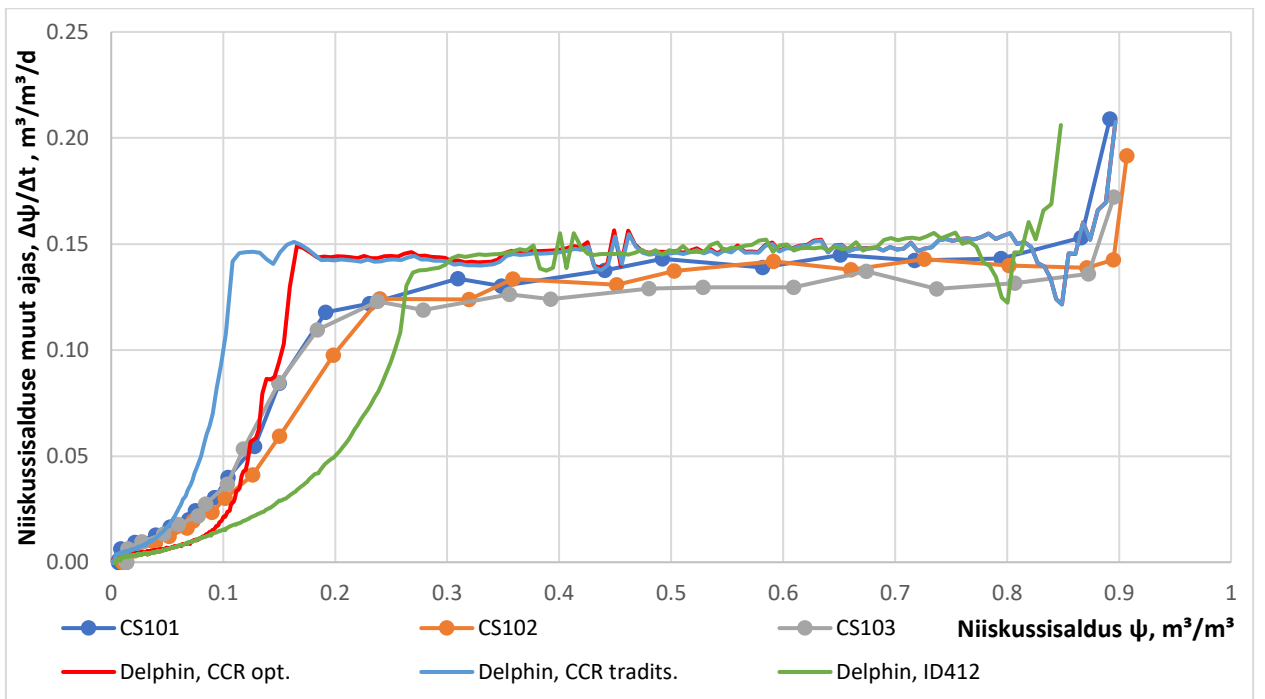


Foto 3.21 Väljakuivamisel pinnatemperatuuri mõõtmine

Kaltsiumsilikaadi intensiivne väljakuivamine ehk kuivamise esimene faas toimus esimese kuue päeva jooksul, mil muutus katsekehade veesisaldus 90%-lt 10%-le (Joonis 3.22). Edasi kulges kuivamine lineaarselt kuni katse 14. päevaks saavutasid katsekehad tasakaaluniiskuse 1%. Samuti sai katsetulemusi võrreldud IBK Delphinis koostatud arvutusmudeliga, millest Epasit epatherm (ID412) näitas, et intensiivse kuivamise lõpp toimub varem, umbes 22% niiskussisalduse juures. Tallinna Tehnikaülikooli poolt modifitseeritud materjalifailid näitasid, et intensiivse kuivamise lõpp toimub madalama niiskussisalduse juures. Antud juhul peaks ID412 näitama täpsemat tulemust, sest tegu on sama katsetatud tootega. Kui vaadata katsetatud materjalide väljakuivamise kiirust erinevate niiskussisalduste juures, siis on näha, et niiskussisalduse 20-85% juures kuivas katsekeha praktiliselt konstantse kiirusega (Joonis 3.23). Tegemist on ülehügrokoopse niiskusvahemikuga, kus vedelikujuhtivus domineerib täielikult veeauru juhtivust. Selle niiskuse juures eraldub vedel vesi materjali pinnale ning aurustub sealt. Vedela vee eraldumine pinnale on kiirem kui vee aurustumine materjali pinnalt. Vedel vesi materjali pinnal blokeerib niiskuse eraldumise läbi aurustumise. Kui niiskussisaldus materjalis langeb piisavalt madalale, avaneb võimalus niiskusel lahkuda läbi materjali pooride aurujuhtivuse teel. Kaltsiumsilikaadi ülehügrokoopne niiskuspiirkond algab umbes 1% niiskussisalduse juures.

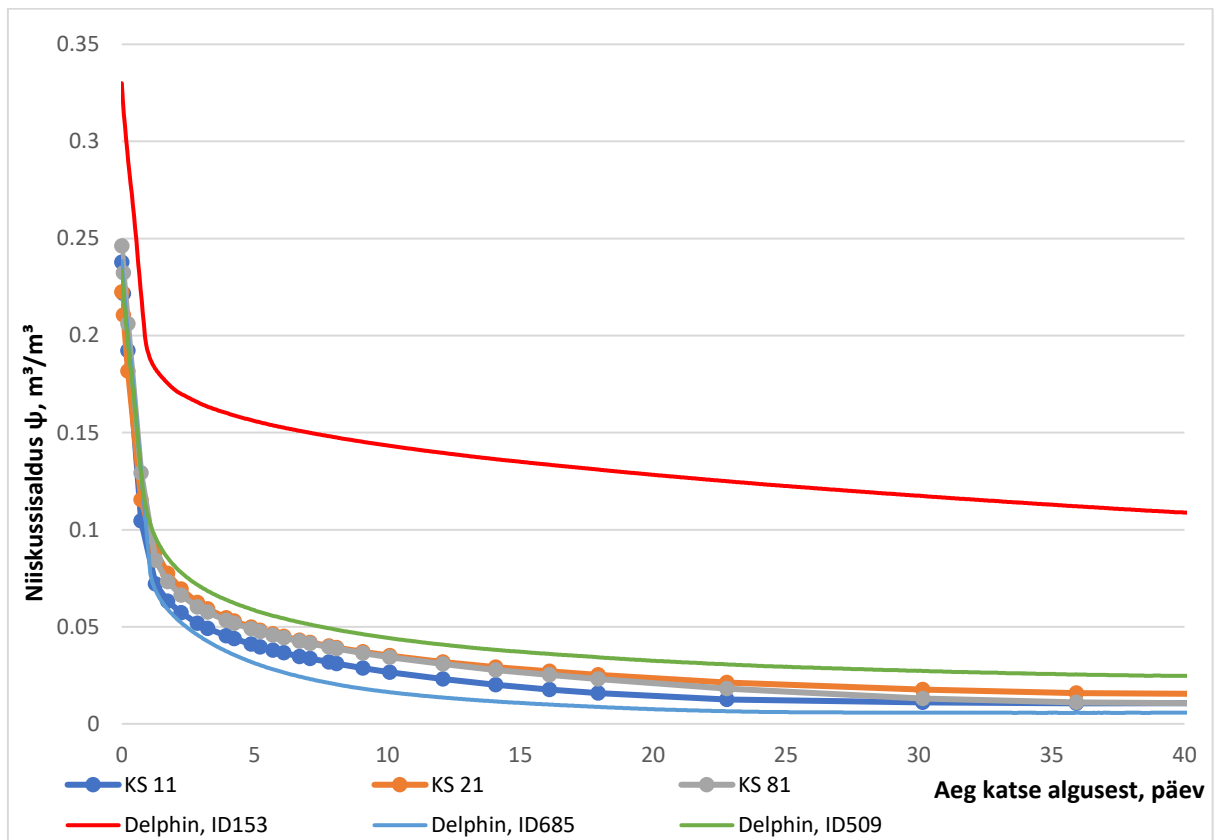


Joonis 3.22 Niiskussisalduse muutus ajas mahu järgi, kaltsiumsilikaat

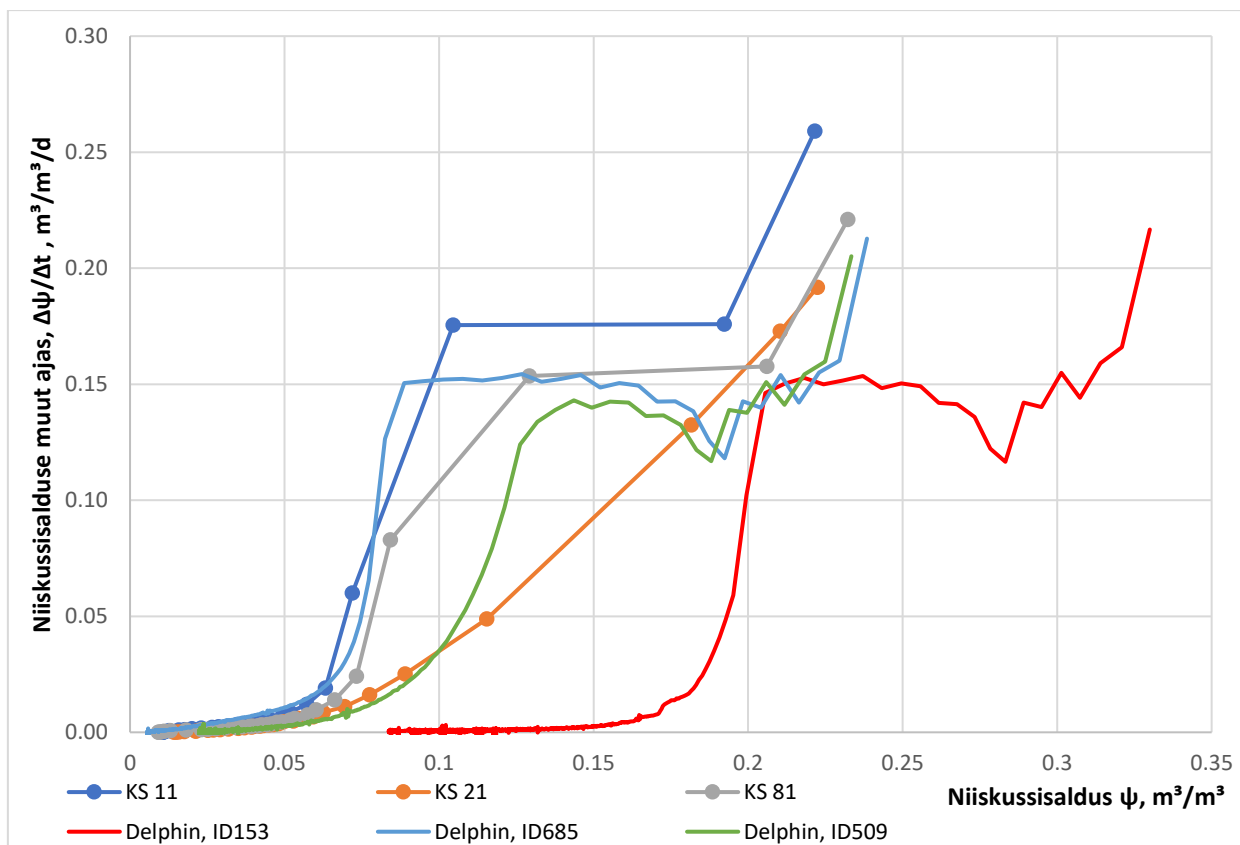


Joonis 3.23 Kuivamise kiirus erineva niiskussisalduse juures, kaltsiumsilikaat

Kui vaadata silikaattellise väljakuivamist, siis on näha, et intensiivne väljakuivamine toimus praktiliselt esimese 24 tunni jooksul (Joonis 3.24). Võrreldes kaltsiumsilikaadiga on kindlasti üheks peamiseks põhjusteks asjaolu, et silikaattellise küllastunud niiskussisaldus on oluliselt madalam kui kaltsiumsilikaadil. Teiseks asjaolu, et poorid on suuremad ning vedelikujuhtivus on oluliselt suurem. Delphinis katsetatud materjalifailidest andsid lähedasema tulemuse ID685 ja ID509, mille difusioonitakistustegurid olid vastavalt 18,744 ja 15,744. ID153 oli traditsiooniline silikaattellis, mille takistus oli mõnevõrra suurem, 40,0. Samuti võib täheldada materjali puhul oluliselt suuremat küllastatud veesisaldust. Ilmselt on materjali poorijaotus oluliselt erinev. Vaadates materjali kuivamiskiirust erinevate niiskussisalduste juures, siis on näha, et vahemikus 10-20% on väljakuivamine konstantne, alla 10% niiskussisalduse juures hakkab langema oluliselt vedelikujuhtivus ja edasi väljub niiskus materjalist peamiselt aurujuhtivuse teel (Joonis 3.25). Silikaattellise ülehügrokoopne niiskuspiirkond algab umbes 2% niiskussisalduse juures.

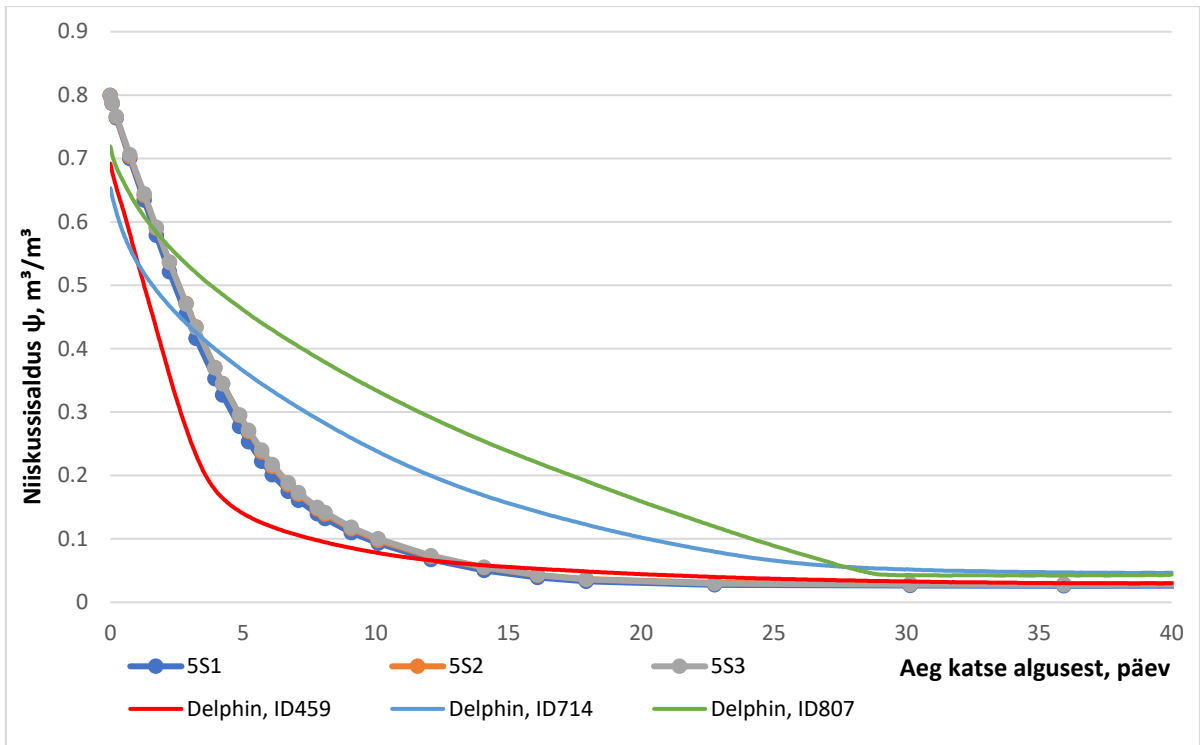


Joonis 3.24 Niiskussisalduse muutus ajas mahu järgi, silikaattellis

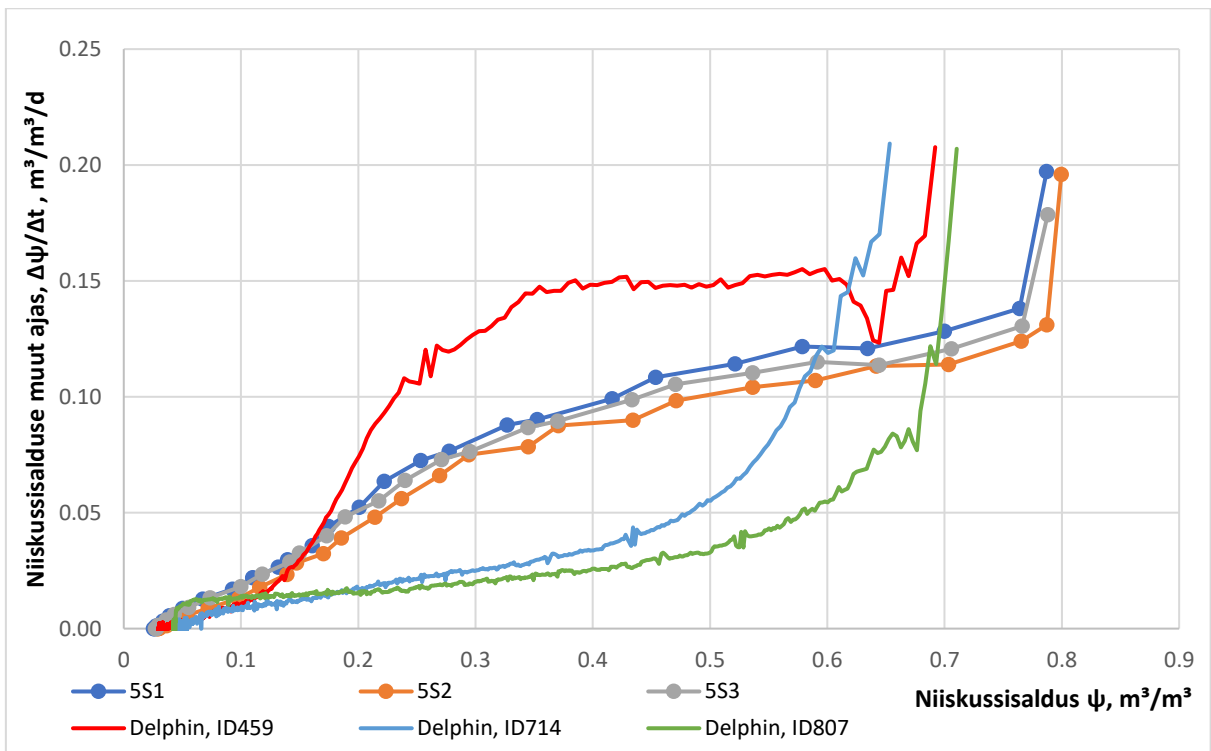


Joonis 3.25 Kuivamise kiirus erineva niiskussalduse juures, silikaattellis

Vaadates puidu kuivamist pikikiudu, võib öelda, et materjal käitub võrdlemisi sarnaselt kaltsiumsilikaadile. Puidu kuivamise esimene faas kestis esimesed 8 päeva (Joonis 3.26). Siiski on kuivamise kiirus veidi aeglasem kui kaltsiumsilikaadil. Delphini arvutusmudelitega võrreldes on kõige lähedasem tulemus ID459-l. Üldiselt on puidu käitumist raskem modelleerida ja prognoosida, sest tegemist on isotroopse materjaliga ning päriselus kiudude paiknemine ei ole nii ideaalne kui arvutustes. Katsetatud materjalide väljakuivamise kiiruse puhul katsetes konstantsed vahemikku välja ei tulnud. On näha, et niiskussalduse vahemikus 20-75% kuivamise kiirus kahaneb lineaarselt (Joonis 3.27). Võrreldes Delphini materjalifailidega, on laboris läbiviidud katse tulemus kusagil vahepeal, ID459 kohaselt peaks väljakuivamine toimuma intensiivsemalt ja ID714 ja ID807 kohaselt oluliselt aeglasemalt. Puidu hügrokoopne niiskuspiirkond algab umbes 10% niiskussalduse juures.

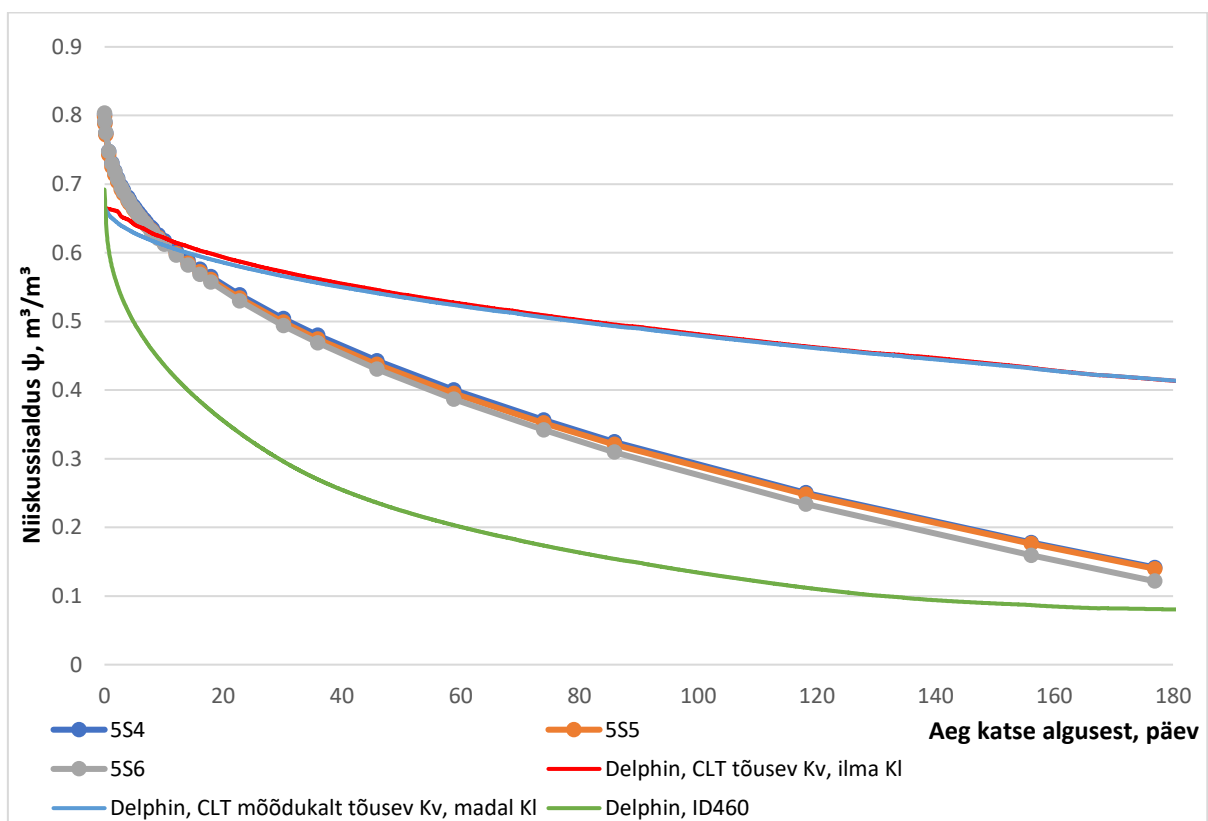


Joonis 3.26 Niiskussisalduse muutus ajas mahu järgi, puidu kuivamissuund pikikiudu

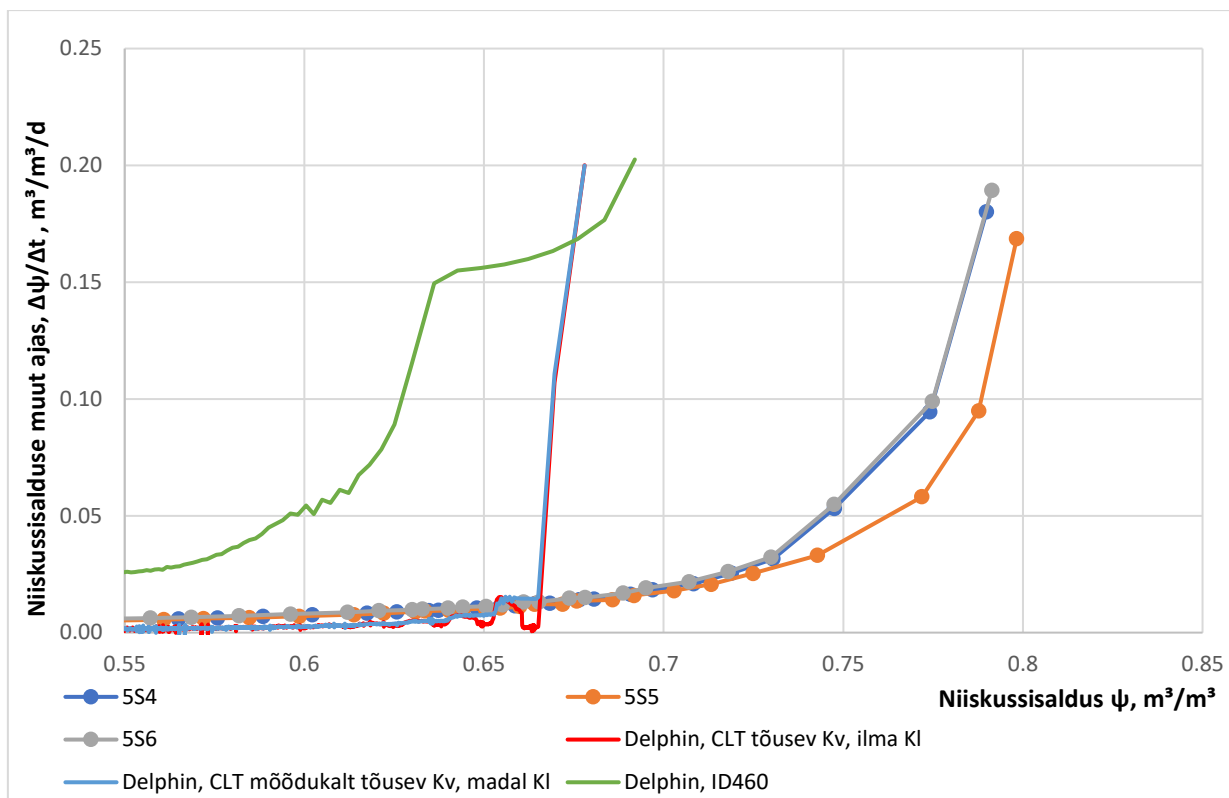


Joonis 3.27 Kuivamise kiirus erineva niiskussisalduse juures, puidu kuivamissuund pikikiudu

Kuna puidu kuivamisel ristikiudu on vedelikujuhtivus niivõrd aeglane, siis lõppes kuivamise esimene faas esimese paari päeva jooksul (Joonis 3.28). Seda võis ka täheldada katse käigus, kus oli märgata, et katsekehade pind oli paari päeva möödudes kuiv. Edasi kuivas katsekeha kuue kuu möödudes, kuni saavutas lõpuks tasakaalustunud niiskussisalduse. Delphini failidest Tallinna Tehnikaülikoolis varasemalt koostatud materjalifailides määrati vedelikujuhtivus praktiliselt olematuks ning ID460 puhul arvestatakse märgatavat vedelikujuhtivust. Katsest selgub, et kuivamise iseloom on pigem sarnane ID460-le, mis tähendab, et ristikiudu on puidul on siiski arvestatav vedelikujuhtivus. Kui analüüsida kuivamise kiirust, siis on näha, et alates 72% veesisaldusest kasvab kiirus eksponentsiaalselt kuni täielikult küllastunud veesisalduseni (Joonis 3.29). Siiski on puit isotroopne materjal ja antud juhul peaks tegema rohkem katseid erinevate kiudude asetustega. Samuti on erinevuseks asjaolu, et katseliselt saavutati vaakumküllastamisega oluliselt suurem veesisaldus, mida puidule naturaalses tingimustes ei ole võimalik tekitada.



Joonis 3.28 Niiskussisalduse muutus ajas mahu järgi, puidu kuivamissuund ristikiudu



Joonis 3.29 Kuivamise kiirus erineva niiskussisalduse juures, puidu kuivamissuund ristikiudu

3.3 Rõhuplaadi katse ja sorptsioonkõverad

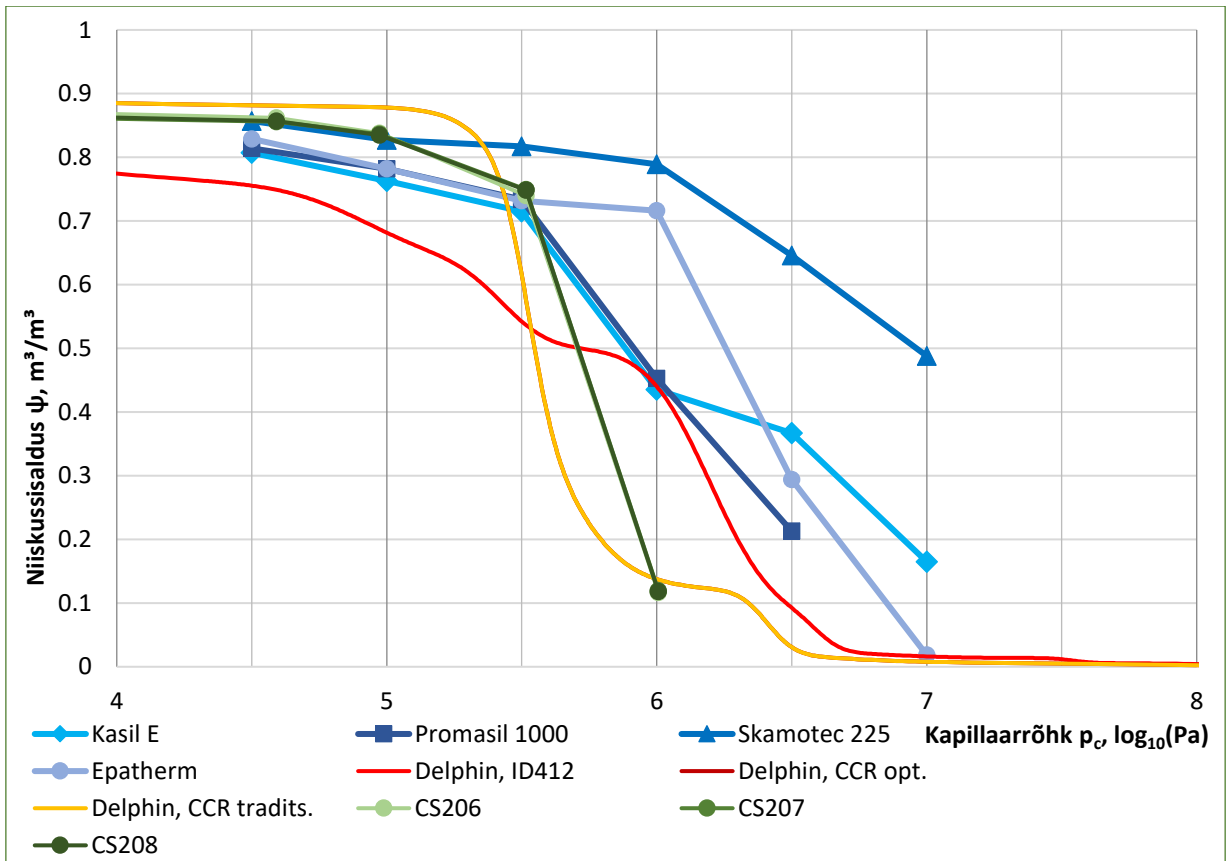
Katse tulemusel saadi sorptsioonkõverale niiskussisalduse väärtused nelja rõhutaseme juures. Iga materjali puhul katsetati kolme katsekeha. Kaltsiumsilikaadist katsekehad CS206, CS207, CS208, silikaattellistest KS1 S1, KS2 S2, KS3 S3. Esimese kahe rõhutaseme juures määrati puitkehadele S1, RS7 ja RS8 niiskussisaldus. Kuna puit oli hallitama läinud, siis võeti kahe viimase rõhutaseme jaoks uued katsekehad S7, S5 ja S2. Antud katse käigus sai rõhutasemed valitud arvestades kaltsiumsilikaadi sorptsioonkõveraid. Aluseks sai võetud Soomes, Tampere ülikoolis tehtud katsekäik, vt. [14]. Antud katses on võimalik maksimaalne saavutatav rõhutase 6,18 $\log_{10}(\text{Pa})$ ehk 15 bari. Tabel 3.30 kajastab kokkuvõtvalt katsetatud materjalide niiskussisaldust erinevate rõhutasemete juures.

Tabel 3.30 Katsekehade veesisaldused erinevate rõhkutasemete juures

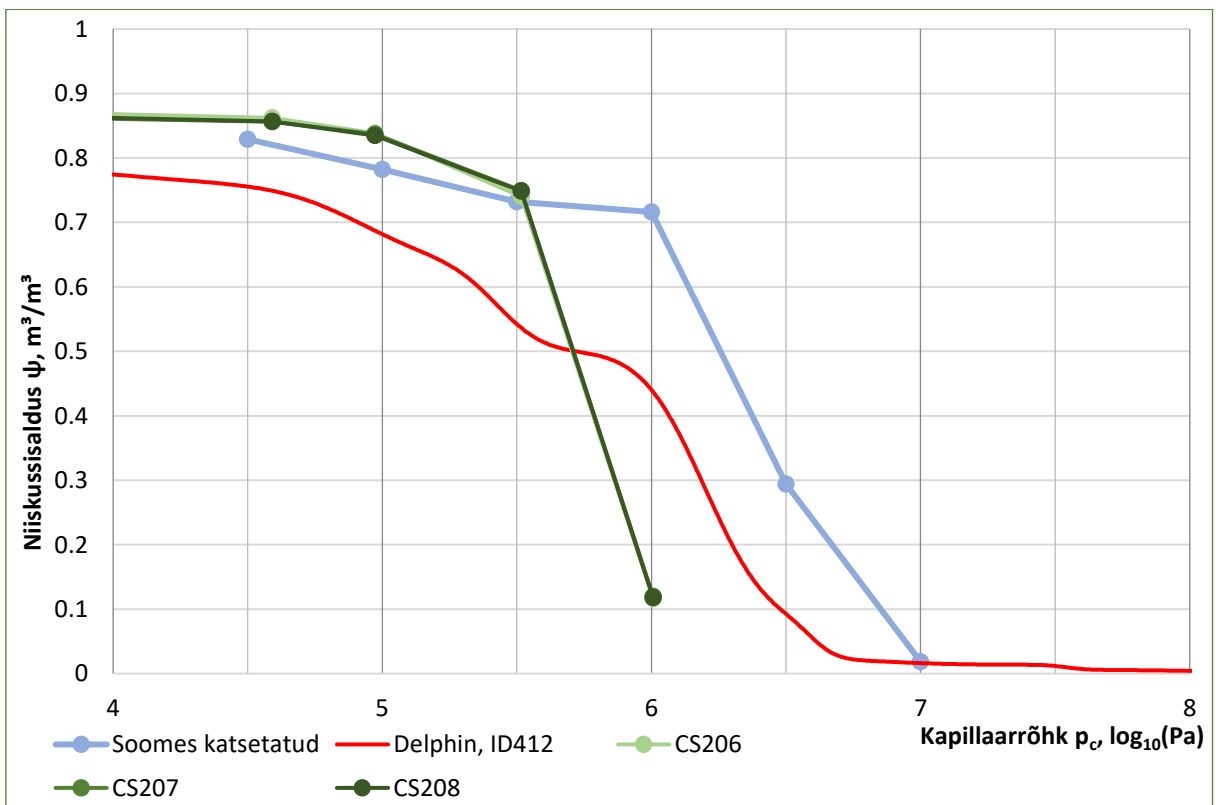
$\psi, [m^3/m^3]$					
Rõhk [Log10(Pa)]	0	4.59	4.97	5.52	6.01
RH [%]	100	99.971	99.931	99.756	99.247
S1	0.910	0.719	0.758*	-	-
RS7	0.890	0.834	0.824*	-	-
RS8	0.899	0.835	0.828*	-	-
KS1 S1	0.224	0.139	0.127	0.120	0.110
KS1 S2	0.215	0.146	0.134	0.125	0.112
KS1 S3	0.214	0.129	0.124	0.119	0.110
CS206	0.908	0.862	0.838	0.740	0.117
CS207	0.891	0.856	0.836	0.749	0.120
CS208	0.899	0.857	0.835	0.748	0.118
S7	0.703*	-	-	0.590*	0.351*
S5	0.863	-	-	0.713*	0.598*
S2	0.887	-	-	0.809*	0.677*

* Ebausaldusväärtused

Alljärgneval graafikul (Joonis 3.31) on välja toodud mõõdetud katsetulemused, Tampere ülikooli katsetulemused ning samuti ka Delphini materjalifailide sorptsioonkõverad. Soomes katseti sama toodet, mis graafikul kannab nime Epatherm. On näha, et Tampere uuringus saadi olulisemalt suuremad niiskussisaldused vastavate rõhutasete juures. Selle põhjuseks on asjaolu, et sealse laboris ei vaakumküllastatud rõhutasete vahepealsel kaalumisel katsekehi ning ei värskendatud savikihti rõhuplaadi peal. Seeläbi kadus hüdrauliline kontakt katsekehade vahelt, mis tingib selle, et rõhk ei liigu läbi katsekeha enda, vaid puhtalt läbi saviplaadi. Delphini materjalifail ID412 on samuti Epatherm ning huvitaval kombel kajastab see esimese kolme rõhutasete puhul 10% madalamat niiskussisaldust ja viimase rõhutasete juures, kui katsega saadi tasakaalu niiskuseks ligikaudu 12%, näitab Delphini materjalifail veesisalduseks hoopis 44%. Siiski klappib saadud katsetulemus üpris hästi varasemalt Tallinna Tehnikaülikooli poolt loodud materjalifailidega, mis põhinevad teisel tootel (Joonis 3.32). Kui võrrelda ühe rõhutasete juures katsekehade niiskussisaldust, siis selle katse puhul on pigem usaldusväärsem tulemus, mis näitab madalamat niiskussisaldust, sest katsekeha kusagilt mujalt keskkonnast niiskust juurde võtta ega ära anda ei saa, ainus võimalus on, kui vesi lahkub rõhkude erinevuse tõttu materjali pooridest.



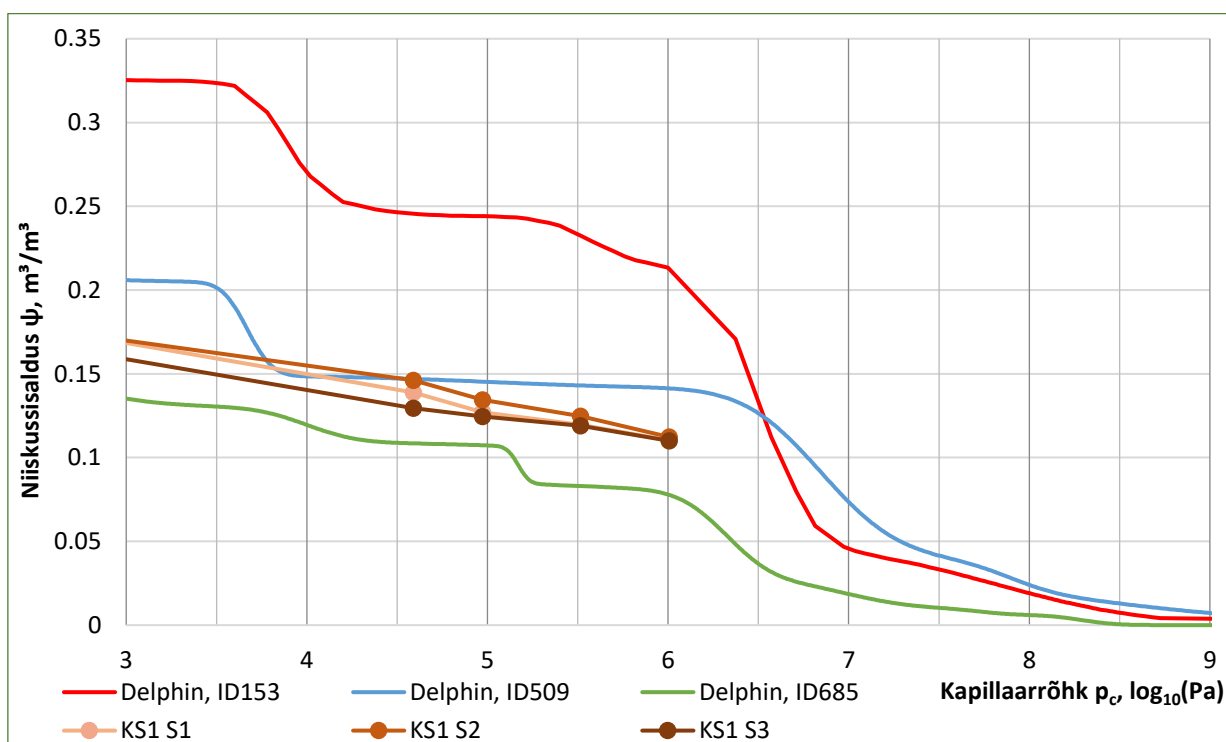
Joonis 3.31 Kaltsiumsilikaadi sorptsioonkõverad



Joonis 3.32 Epatherm kaltsiumsilikaadi sorptsioonkõverad

[14]

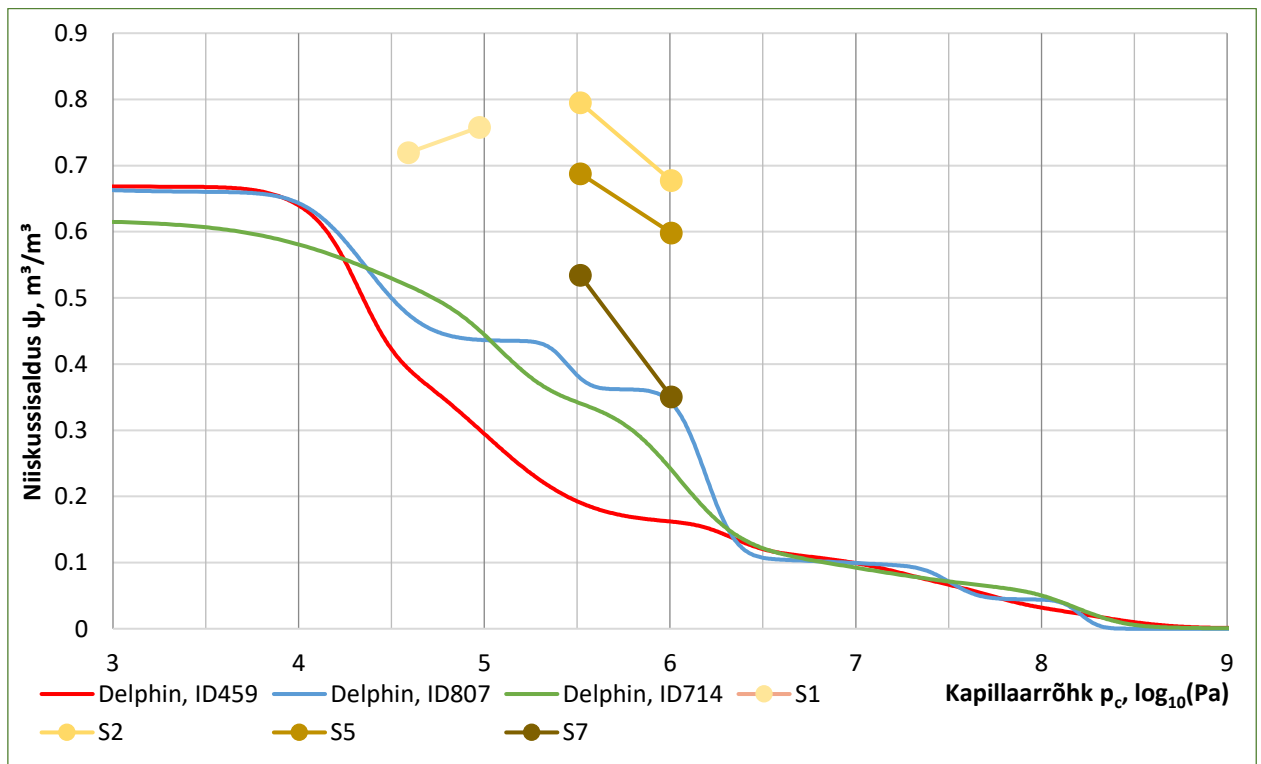
Kui analüüsida silikaattellise katseliselt määratud tulemeid Delphini materjalifailide sorptsioonkõveratega, siis võiks öelda, et katse kinnitab olemasolevat – ID509 ja ID685 on omadustelt kõige sarnasem katsetatud tellisele (Joonis 3.33). Kuna rõhutasemed said katses valitud kaltsiumsilikaadi sorptsioonkõvera järgi, siis hetkel silikaattellisega jäid katsetulemused võrdlemisi lauge sirgjoone peale. See tähendab seda, et materjalidel on erinevad murdepunktid sorptsioonkõveral, kuna poorsus on erinev. Silikaattellise jaoks tuleks katset teha rõhuvahemikes $3,5-4 \log_{10}(\text{Pa})$ ja $6-7 \log_{10}(\text{Pa})$. Antud hetkel katseruumis paikneva seadme maksimaalne võimalik rõhutase on ligikaudu $6,18 \log_{10}(\text{Pa})$.



Joonis 3.33 Silikaattellise sorptsioonkõverad

Kui hinnata puidu katsetulemusi alloleval graafikul (Joonis 3.34), siis võib öelda, et katse sisuliselt ebaõnnestus ning saadud tulemused adekvaatsed ei ole. Kuna katsekehad vahetusid teise ja kolmanda etapi vahel ning kolmanda ja neljanda etapi katsekehad ebaõnnestusid muudel põhjustel, siis puuduvad ühe katsekeha kohta täies ulatuses mõõtetulemused, mis oleks tõlgendatavad. Teist rõhutaset korrati ühe korra, et uurida vaheküllastamise mõju katsetulemustele ning selgus, et puitkehad olid läinud vahepeal hallitama ning nende kaal oli suurem kui peale esimest rõhutaset. Suure tõenäosusega pole antud hetkel teise punkti veesisaldus õige, vaid katsekeha võttis massis juurde hallituse arvelt. Kolmanda ja neljanda rõhutaseme puhul võib märgata olulist

veesisalduse erinevust sama materjali puhul. Samuti oli katseadme lahtivõtmisel märgata ebaühtlaselt kuivi katsekehasid ning osade katsekehade peale oli kogunenud vesi, justkui oleks rõhk vastupidises suunas poorides liikunud. Samuti võis täheldada, et katsekeha S7 ei õnnestunud korralikult vaakumküllastada, mis tähendab, et väiksemad poorid ei täitunud veega. S2 ja S5 puhul on rõhutasete juures samuti veesisalduse erinevus üpris suur, umbes 10%. See võib olla tingitud suuresti kiudude asetusest, antud katses on väga suur mõju kiudude paiknemisel ja on ülimalt oluline, et kiudude suund oleks võimalikult rõhuplaadi sihis. Katse kordamisel tuleks katsekehade valikul sellele olulist tähelepanu pöörata.



Joonis 3.34 Pikikiudu puidu sorptsioonkõverad

KOKKUVÕTE

Antud töös keskenduti erinevate ehitusmaterjalide ehitusfüüsikaliste omaduste määramisele. Täpsemalt oli fookuses niiskuslevi omadused ja nende määramise meetodikate väljatöötamine. Uurimustöös katsetatud materjalideks osutusid kaltsiumsilikaat, silikaattellis ja puit (kuusk), puidu omadusi uuriti katsetes kahes suunas, nii piki- kui ka risitkiudu. Tegemist on levinud materjalidega, mida on varasemalt uuritud ning mille põhjal saab analüüsida läbiviidud katsete toimivust. Katsete läbiviimiseks püstitati labor koos vajalike katseseadmetega Tallinna Tehnikaülikooli uude õppehoonesse Mäepealse 3, ruumi 016. Kuivamiskatse jaoks ehitati ventilaatoritega varustatud tuuletunnel ning uuriti veega küllastunud katsekehade väljakuivamise kiirust. Rõhuplaadi katse jaoks kasutati seadet *Soilmoisture pressure plate extractor 1500f2*, millega tuletati materjalide sorptsioonkõverad. Topsikatsete puhul tuletati materjalide veeauru difusioonitakistustegurid kuivas ja niiskes keskkonnas ning tuletati summaarsest niiskuslevist materjalide veeauru- ja vedelikujuhtivuse näitajad.

Topsikatsete teostamiseks modifitseeriti vana veinikülmikut. Külmikusse lisati sahtlitasandid, kuhu paigutati kuiva ja märja topsi katsekehad. Sahtlitasandite sektsioonid varustati ventilaatoritega, mis vähendaks pinnatakistust katsekehade pealispinnal. Iga materjali kohta valmistati üks katsetops standardi ISO 12572:2016 kohaselt ning katsekäigus fikseeriti katsetopside massimuutu ajas. Märja topsikatse puhul on niiskusvoog topsist välja ja kuiva topsikatse puhul voog suunaga topsi sisse. Sellest tuletati katsetatud materjalidele difusioonitakistustegurid. Märja topsikatse niiskuslevi on intensiivsem, sest katsekehade niiskussisaldus on suurem. Lisaks standardsetele kuiva ja märja topsi katsetele töötati välja ka mitteisotermiline topsikatse. Standardkatsete puhul on katsekehade pinnatemperatuurid võrdsed mõlemal pool ja seetõttu on veeauru- ja vedelikuvoog samasuunalised. Katsetopsid paigutati aga külmkapi ukse tasandisse ja seeläbi saadi katsekehade mõlemale poole erinev temperatuur, mis läbi tekitati olukord, kus teoreetiline vedeliku voog ja veeauru voog on erisuunalised. Kui varasemalt on arvatud, et niiskusjuhtivus suureneb vedelikujuhtivuse arvelt, siis katsetest selgus, et selle mõju on ülehinnatud ning tegelikult suureneb tõenäoliselt ka materjali veeauru juhtivus niiskussisalduse tõustes. Mitteisotermilise topsi katsetulemustest selgus, et puitmaterjalil pikikiudu on märgatav kapillaarne vedelikujuhtivus 65% suhtelise õhuniiskuse juures, kuna märja mitteisotermilise topsi difusioonitakistus oli sama mis kuival topsikatsel. Teistel materjalidel märgatav vedelikujuhtivuse mõju hügroskoopses niiskusvahemikus ei avaldanud ning tõenäoliselt avaldub see alles ülehügroskoopses niiskusvahemikus,

alates 95-98% suhtelisest õhuniiskusest. Sellist keskkonda on aga topsikatsetega keeruline saavutada.

Kuivamiskatse jaoks sai ehitatud alumiiniumprofiilist tuuletunnel, mille otsad on varustatud ventilaatoritega, mis tagavad konstantse õhuvoolu tunnelis. Seadme alumisel küljel asuvad sahtlid, kuhu paigutati katsekehade kuubikud, mis isoleeriti alumiiniumteibiga muudelt tahkudelt nii, et avatud tahk paikneb tunneli tasandis. Veega vaakumküllastatud katsekehade väljakuivamisest tingitud massimoot fikseeriti ajas ning seeläbi tuletati kuivamiskiirused. Väljakuivamise iseloomust ilmnisid selgelt iseloomulikud esimene ja teine faas. Esimeses faasis oli materjalide kuivamiskiirus konstantne, katsekeha seest eraldus vedel vesi materjali pinnale, kust ta seejärel aurustuda sai. Esimene faas sõltub täielikult keskkonnatingimustest, sest aurustumine toimub materjali pinnalt ümbritsevasse keskkonda. Sel perioodil on materjali pind nähtavalt märg ja pinnatemperatuur on madalam, kuna aurustumine on endotermiline protsess. Kuivamise teises faasis on materjali niiskussisaldus selline, et materjali pinnale eraldub vett vähem, kui sealt jõuab ära kuivada ümbritsevasse keskkonda. Materjali veesisaldus langeb koos kuivamise intensiivsusega ning vedelikujuhtivus langeb. Teises faasis algab aurustumine materjali sees ning vesi lahkub materjalist aurujuhtivuse näol. Esimene faasi kestus sõltub vedelikujuhtivusest ja kuivamise kiirus sõltub täielikult keskkonna tingimustest. Kuivamise teine faas annab informatsiooni niiskuslevi omaduste kohta ülehügrokoopse niiskussisalduse madalamas vahemikus.

Rõhuplaadi katse puhul sai kasutatud seadet, mille maksimaalne rõhutase oli 15 bari. Kuna iga rõhutaseme puhul tasakaalustunud niiskussisalduse saavutamine võib mitu kuud aega võtta, siis valiti 4 erinevat rõhutaset varasemalt teostatud kaltsiumsilikaadi katsetest lähtuvalt. Iga rõhutaseme juures fikseeriti katsekehade kaal, millest tuletati sorptsioongraafik, mis kajastab materjali niiskussisaldust erinevate kapillaarrõhkude korral. Selgus, et katsekäigus valitud rõhutasemed sobisid kaltsiumsilikaadile. Silikaattellise puhul ilmneb suurem niiskussisalduse langus veidike madalamate ja oluliselt kõrgemate rõhutasemete juures, mida antud katseseadmega ei olnud antud hetkel ka võimalik saavutada. Samuti osutus keeruliseks puitkehade katsetamine, kuna materjal läks hallitama ning võttis massis juurde hallituse arvelt. Lisaks sellele mängib olulist rolli kiudude paiknemine ning antud katses on oluline, et kiudude suund oleks võimalikult täisnurga all rõhuplaadi tasandiga.

Töös läbiviidud katsed õnnestusid ning eeldused pidasid paika. Kui hinnata materjalide tulemusi, siis võib öelda, et kõige selgema tulemuse andis kaltsiumsilikaat ning Delphini simulatsioonis ühtisid kõige enam CCR opt. ja CCR tradits. materjalifailid. Silikaattellise puhul ühtisid materjalifailid ID509 ja ID685 katsetulemustega. Puit orgaanilise

heterogeense isotroopilise materjalina osutus kõige problemaatilisemaks, kuna niiskuslevi omadused sõltuvad väga suurel määral kiudude paiknemisest ning pikaajaliselt niiskes keskkonnas viibides võib materjal hallitama minna. Puidu puhul pikikiudu olid simulatsioonid kõige sarnasemad materjalifaili ID459 puhul ja ristikiudu ID460 puhul. Kindlasti tuleks rõhuplaadi ja topsikatseid korrata puitmaterjalide puhul. Ristikiudu puidus toimub niiskuslevi aeglaselt ning tuleks teha rohkem katsekehi, et saada rohkem varieeruvat informatsiooni materjali kohta. Samuti tuleks suurendada laboris asuva rõhuplaadi katseseadme võimekust, kuna on materjale, mille informatiivne sorptsioonkõvera osa paikneb oluliselt kõrgemate rõhutasete juures.

SUMMARY IN ENGLISH

Current research was carried out to determine building physic properties to different materials used in construction. To be more precise, the project scope was to study moisture transport and how to determine moisture transport related properties of materials through different experimental methods. Tested materials were calcium silicate, silicate brick and spruce. Wood properties were studied longitudinal and radial or tangential direction. These materials have been widely studied before and there is sufficient amount of data to prove experiments validity. To carry out experiment, the laboratory was set up in new building of Tallinn University of Technology, Mäepealse 3, room 016. For drying experiment, a drying apparatus was built, which enabled to measure drying data of saturated specimens. Material moisture storage function was studied with pressure plate extractor apparatus, model 1500f2. From dry cup experiments, material water vapour diffusivity was measured. In wet cup experiment, the moisture transport included vapour diffusivity, and also liquid water conductivity. To carry out cup experiments, old wine fridge was modified accordingly. Different levels were added inside to fridge, on which test cups were placed. Each level was supported with ventilator in order to reduce surface resistance factor on test specimen surface. For each tested material one cup was prepared according to ISO 12572:2016 and during the experiment, mass change in time was measured. Wet cup moisture flux direction is out of cup and dry cup moisture flux direction is into cup. From these, water vapour resistance factor was deduced. Wet cup moisture flux is greater than dry cup flux, because water content is bigger. In addition to traditional dry and wet cup experiment, non-isothermal cup experiment was carried out. The main difference between standard cup experiments and non-isothermal is that non-isothermal cup has different temperatures on specimens surfaces. It was achieved by placing the test cup inside the fridge door. Therefore, the vapour flux was into the cup and liquid water flux was out of cup. It has been thought that moisture transport increases with higher moisture content only due to liquid water conductivity. From experiments it became very clear that impact of liquid water conductivity is overrated and the moisture transport increases also because water vapour diffusivity increases. From experiments it was noticed that only spruce in longitudinal direction had noticeable liquid water conductivity at relative humidity of 65%, because non-isothermal water vapour resistance factor was equal to dry cup value. Other materials didn't have markable liquid conductivity values at hygroscopic moisture range. Liquid conductivity will start to be apparent most likely at 95-98% of relative humidity for other materials. That type of environment is difficult to achieve with cup tests.

For drying experiment, firstly frame was built from hollow rectangular aluminium profile. Both ends of the apparatus were supplied with ventilators, which ensured constant smooth air flow through tunnel. Sides and top were covered with clear acrylic sheets. The bottom of the tunnel has 4 drawer sections, which each have 3 section for specimens. Each specimen was sealed so the vacuum saturated specimens could only dry out from one side, which was facing the tunnel with airflow. Mass change in time was measured and drying speed was deduced. From drying experiment two phases were clearly distinguished. In first phase, liquid water emits from material to surface, where it evaporates. During this, moisture doesn't leave through vapour diffusivity and the drying speed is limited only to environmental conditions. Mass change in time is constant and surface temperature is significantly lower since evaporation is endothermic process. During second phase, moisture content is low enough that evaporation takes place faster than the liquid transport to surface. So, evaporation starts to begin inside the material and moisture starts to leave as water vapour diffusivity. These phases transfer from one to another smoothly in time as moisture content in material decreases over time. Second phase gives information about material moisture transport properties in lower overhygroscopic moisture range since the first one is purely dependent on environmental conditions.

The pressure plate extractor model, which was used in this experiment, had maximum capability of 15 bars. Since it could take couple of months for specimens to reach equilibrium moisture content according to selected pressure level, four different pressure levels were selected. Even though three different materials were tested at once, pressure levels were selected to fit calcium silicate specimens. In result moisture storage function was drawn from moisture contents according to capillary pressure. It appeared that silicate brick has its moisture storage curve at much higher pressure levels, which were not reachable with 15 bar extractor. Also, it was difficult to test spruce, since wood had mold on surface which caused specimens to increase in mass. Also, wood fiber directions play very important role in this test and test subject should be properly selected, so the fibers would be as longitudinal as possible.

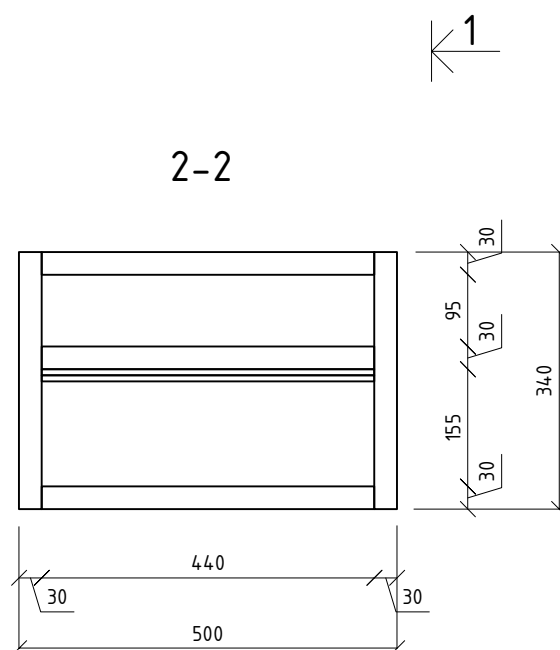
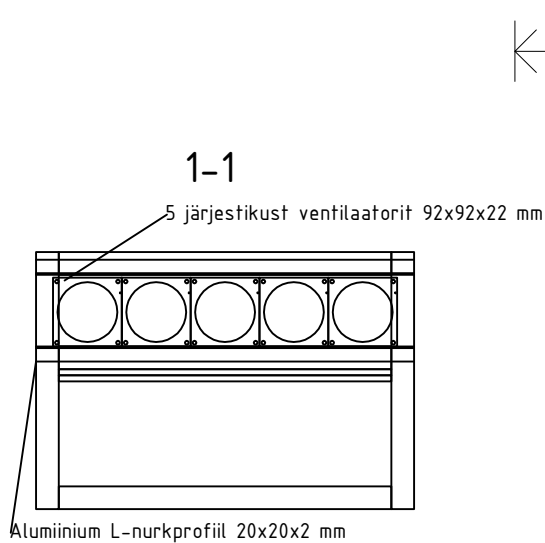
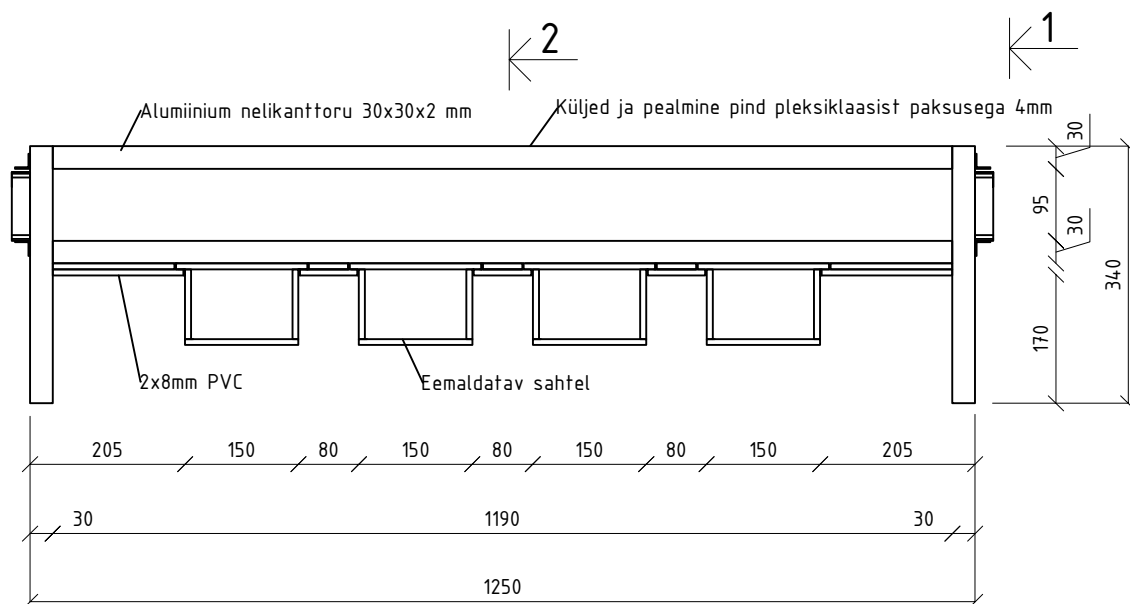
To sum it up, experiments carried out in this research were successful and the assumptions made at beginning held true. From materials the most successful data was retrieved from calcium silicate and the program simulations were most similar with CCR opt. and CCR tradits. material files. Silicate brick had most similar results with material files ID509 and ID685. Wood as heterogenic isotropic and organic material turned out to be the most difficult material to study due to fact that moisture transport is very heavily dependent of fibre direction and during long lasting experiments, wood with higher moisture content might start to mold. In longitudinal direction the simulations matched best with ID459 and in radial direction with ID460. Additional pressure plate

and cup experiments should be carried with wood specimens. More test cups for wood with radial or tangential fibres should be made to get more variable data. Pressure plate apparatus should be upgraded to be able to provide bigger pressure levels since some materials give informative data about moisture storage at greater capillary pressure levels.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Schellfer GA. *VALIDATION OF HYGROTHERMAL MATERIAL MODELLING UNDER CONSIDERATION OF THE HYSTERESIS OF MOISTURE STORAGE*. 1978.
- [2] Rode C, Schou M, Lund M. *Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions*. 2016.
- [3] Scheffler G. *Hygrothermal Material Characterisation, Material Functions and Experiments*. 2013.
- [4] Building materials: Retention curve and pore size distribution. *NORDTEST*; 481, www.nordtest.org (1997).
- [5] Scheffler GA, Plagge R. *Methods for moisture storage and transport property determination of autoclaved aerated concrete*.
- [6] Eesti standardikeskus. EVS-EN ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method (ISO 12572:2016).
- [7] Standard Test Method for Moisture Retention Curves of Porous Building Materials Using Pressure Plates. Epub ahead of print 2015. DOI: 10.1520/C1699-09R15.
- [8] Raado L-M. *Ehitusmaterjalid*. Tallinn: Sihtasutus Professor Karl Õigeri Stipendiumifond, 2018.
- [9] M. Van Belleghem MSAJMDP. Drying behaviour of calcium silicate. *Construction and Building Materials* 2014; 65: 507–517.
- [10] Greenspan L. *Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions*. 1976.
- [11] Scheffler G, Plagge R. Bestimmung des Trocknungsverhaltens von Baustoffen unter definierten Randbedingungen. *Bauphysik* 27.
- [12] SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. *1500F2 OPERATING INSTRUCTIONS*. 2015.
- [13] Feng C, Feng Y, Meng Q, et al. Best choice of the separating material for pressure plate tests. In: *Energy Procedia*. Elsevier Ltd, 2015, pp. 1389–1394.
- [14] Tuominen O, Tuominen E, Vainio M, et al. Thermal and moisture properties of calcium silicate insulation boards. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1051/mateconf/201928.
- [15] Klöšeiko P, Kalamees T. Hygrothermal performance of a brick wall with interior insulation in cold climate: Vapour open versus vapour tight approach. *Journal of Building Physics* 2021; 174425912110560.

Külgvaade



Tallinna Tehnikaülikool
Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086

Joonis:

Tuuletunneli koostejoonis

Mõõtkava:
1:10