TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

KIUDMULLBETOONI NIISKUSLIKE OMADUSTE KATSELINE UURIMINE

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYGRIC PROPERTIES OF FIBER REINFORCED AERATED CONCRETE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaspar Kaljuvee

Üliõpilaskood: 177444EAEI

Juhendaja: Paul Klõšeiko, teadur

Tallinn 2023

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kaspar Kaljuvee, 177444EAEI

Õppekava, peaeriala: EAEI02/17 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendaja(d): Paul Klõšeiko, teadur, +372 6202403

Konsultant: Nuno Manuel Monteiro Ramos, dotsent, Porto Ülikool

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kiudmullbetooni niiskuslike omaduste katseline uurimine.

(inglise keeles) Experimental investigation of Hygric properties of fiber reinforced aerated concrete.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Materjalikatsete läbiviimine.
2. Katsete analüüs ja juhtimiskõverate tuletamine.
3. Mõõdetud materjaliomaduste võrdlus arvutustarkvara andmebaasist pärit materjalidega. Paari näitliku tüüptarindi modelleerimine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjalikatsete läbiviimine	15.05.23
2.	Katsetulemuste analüüs ja lõputöö koostamine	15.12.23

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 22.12.2023

Üliõpilane: Kaspar Kaljuvee /digitaalselt allkirjastatud/ /allkiri/ /kuupäev digiallkirjal/

Juhendaja: Paul Klõšeiko /digitaalselt allkirjastatud/ /allkiri/ /kuupäev digiallkirjal/

Programmijuht: Irene Lill

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA 5

1. SISSEJUHATUS 6

1.1 KIUDMULLBETOON 6

1.1.1 MULLBETOON 6

1.1.2 KIUDUDE MÕJU MULLBETOONI OMADUSTELE 7

1.2 MATERJALI SOOJUSLIKUD JA NIISKUSLIKUD OMADUSED 8

1.2.1 MATERJALI SOOJUSLIKUD OMADUSED JA NENDE MÄÄRAMINE 8

1.2.2 MATERJALI NIISKUSLIKUD OMADUSED 10

TASAKAALUNIISKUS 10

VEEAURUJUHTIVUS 12

VEDELA VEE JUHTIVUS 13

1.3 SOOJUSLIKE JA NIISKUSLIKE PROTSESSIDE MODELLEERIMINE TARKVARAS DELPHIN 13

2. KATSEMETOODIKAD 15

2.1 KATSETATUD MATERJAL 15

2.2 NETOKUIVTIHEDUS JA POORSUS 16

2.3 TASAKAALUNIISKUS 20

2.3.1 TASAKAALUNIISKUS HÜGROSKOOPSES PIIRKONNAS 20

2.3.2 TASAKAALUNIISKUS ÜLEHÜGROSKOOPSES PIIRKONNAS 22

2.4 KAPILLAARNE KONDENSAADI ÜMBERJAOTUMINE 27

2.5 VEEAURUJUHTIVUS 30

2.5.1 ISOTERMILINE TOPSIKATSE 30

2.5.2 MITTEISOTERMILINE TOPSIKATSE 34

2.6 VEEIMAVUS 35

2.7 KUIVAMISKATSE 38

2.8 MATERJALIOMADUSTE MODELLEERIMINE 40

2.8.1 MUDELITE ÜLESEHITUS 40

3. KATSETULEMUSED JA JÄRELDUSED 44

3.1 NETOKUIVTIHEDUS JA POORSUS 44
3.2 TASAKAALUNIISKUS 45
3.3 KAPILLAARNE VEEIMAVUS 49
3.4 KUIVAMINE 51
3.5 KAPILLAARNE KONDENSAADI ÜMBERJAOTUMINE 55
3.6 VEEAURUJUHTIVUS 59

4. MODELLEERIMISEKS VEDELIKU- NING AURUJUHTIVUSKÕVERATE KOOSTAMINE 61

4.1.1 ADSORPTSIOON- JA DESORPTSIOONKÕVERAD 61
4.1.2 VEDELIKU- JA AURUJUHTIVUSKÕVERAD 62

5. TULEMUSTE VÕRDLUS ARVUTUSTARKVARA ANDMEBAASIST PÄRIT MATERJALIDEGA 64

6. NÄITLIKE TÜÜPTARINDITE MODELLEERIMINE 66

6.1 POORBETOONI NIISKUSSISALDUSED 66
6.2 SOOJUSVOOG 69
6.3 NIISKUSSISALDUS JA TEMPERATUUR VÄLISPINNA LÄHEDAL 70
6.4 HALLITUSE KONTROLL SISEPINNAL 73

KOKKUVÕTE 75

ENGLISH SUMMARY 77

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 80

EESSÕNA

Lõputöö teema pakkus autorile välja juhendaja Paul Klõšeiko TalTechi Liginullenergiahoonete uurimisrühma poolt teostatava arendusprojekti raames. Antud projekti raames teostati eksperimentaalkorras toodetud kiudmullbetooni täiemahuline soojuslike, niiskuslike ja mehaaniliste omaduste määramine. Varasemalt on lõputööde ja muude projektide raames tehtud mitmeid poorsete materjalide soojuslike ja niiskuslike omaduste uurimusi, kuid enamasti on niiskuslike omaduste uurimine olnud võrdlemisi väiksemahuline. Seega otsustasime keskenduda lõputöös ainult niiskuslike omaduste uurimisele, mis võimaldas uurida neid laiemalt ja rohkem sügavuti kui varasemates lõputöödes.

Töö raames teostati kiudmullbetooni niiskuslike omaduste täiemahuline katseline uurimine, mis hõlmas endas järgnevaid eksperimente: tasakaaluniiskuse leidmine nii ad- kui desorptsioonil hügroskoopses ja ülehügroskoopses niiskuspiirkonnas; kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse; veeaurujuhtivuse määramine nii isotermilistes kui mitteisotermilistes tingimustes; kapillaarse veeimavuse katse; kuivamiskatse. Kõik eksperimendid viidi läbi TalTechi Mäepealse 3 asuvates laboratooriumites.

Lisaks materjaliomaduste määramisele kasutati neid andmeid koos projekti raames leitud soojuslike omadustega soojus- ja niiskustehniliseks dünaamiliseks modelleerimiseks. Modelleerimise käigus võrreldi katsetulemusi loodud materjalifailiga saavutatud modelleerimistulemustega ja tarkvara andmebaasist pärit materjalidega. Samuti modelleeriti Eesti kliimatingimustes antud materjali potentsiaalse kasutusväljundi, ehk ühe- või kolmekihilise soojustatud seinapaneeli toimivust. Traditsiooniliselt on kolmekihilised tehaseliselt toodetud soojustatud välisseinapaneelid, mida kasutatakse näiteks kortermajade ehitamisel, valmistatud normaalbetoonist, mis on mullbetoonist kordades materjalikulukam. Selle asendamine mullbetooniga aitaks vähendada potentsiaalselt nii hoone maksumust kui süsinikujalajälge.

Autor soovib tänada igakülgse abi eest kogu TalTechi liginullenergiahoonete uurimisrühma, eesotsas juhendaja Paul Klõšeikoga. Samuti suur tänu konsultandile Nuno Manuel Monteiro Ramosele Porto Ülikoolist.

Märksõnad: ehitusfüüsika, poorbetoon, dünaamiline modelleerimine, magistritöö

1. SISSEJUHATUS

1.1 Kiudmullbetoon

1.1.1 Mullbetoon

Mullbetoon on autoklaavitud tehiskivi, mis on võrreldes normaalbetooniga tunduvalt madalama tiheduse ja kõrgema poorsusega. Mullbetoonis olevad poorid moodustavad kuni 85 % kogu materjali mahust. Sideainena kasutatakse tsementi, lupja või põlevkivituhka. [1]

Tabel 1.1 Mullbetooni liigitus netokuivtiheduse alusel [1]

Netokuivtihedus, kg/m^3	**Liigitus**
<500	Soojusisolatsioonbetoon
500 kuni 900	Konstruktsioon-soojusisolatsioonbetoon
900 kuni 1000	Konstruktsioon-mullbetoon

Normaalbetooniks loetakse betooni, mille netokuivtihedus on 2000 kuni 2600 kg/m^3, seega on mullbetoon ligikaudu 2 kuni 5 korda kergem kui normaalbetoon. Samas on mullbetooni soojuserijuhtivus 10 kuni 20 korda madalam kui normaalbetoonil, olles 400 kg/m^3 tiheduse juures 0,07 kuni 0,11 W/(mK). Normaalbetooni soojuserijuhtivus on 1,6 kuni 1,8 W/(mK). Kõrge poorsuse tõttu on mullbetooni survetugevus normaalbetoonist tunduvalt madalam. 400 kuni 800 kg/m^3 netokuivtiheduse juures on mullbetooni survetugevus 2 kuni 6 MPa, samal ajal kui normaalbetooni survetugevus võib ulatuda 60 MPa-ni. [1][2][3], [4]

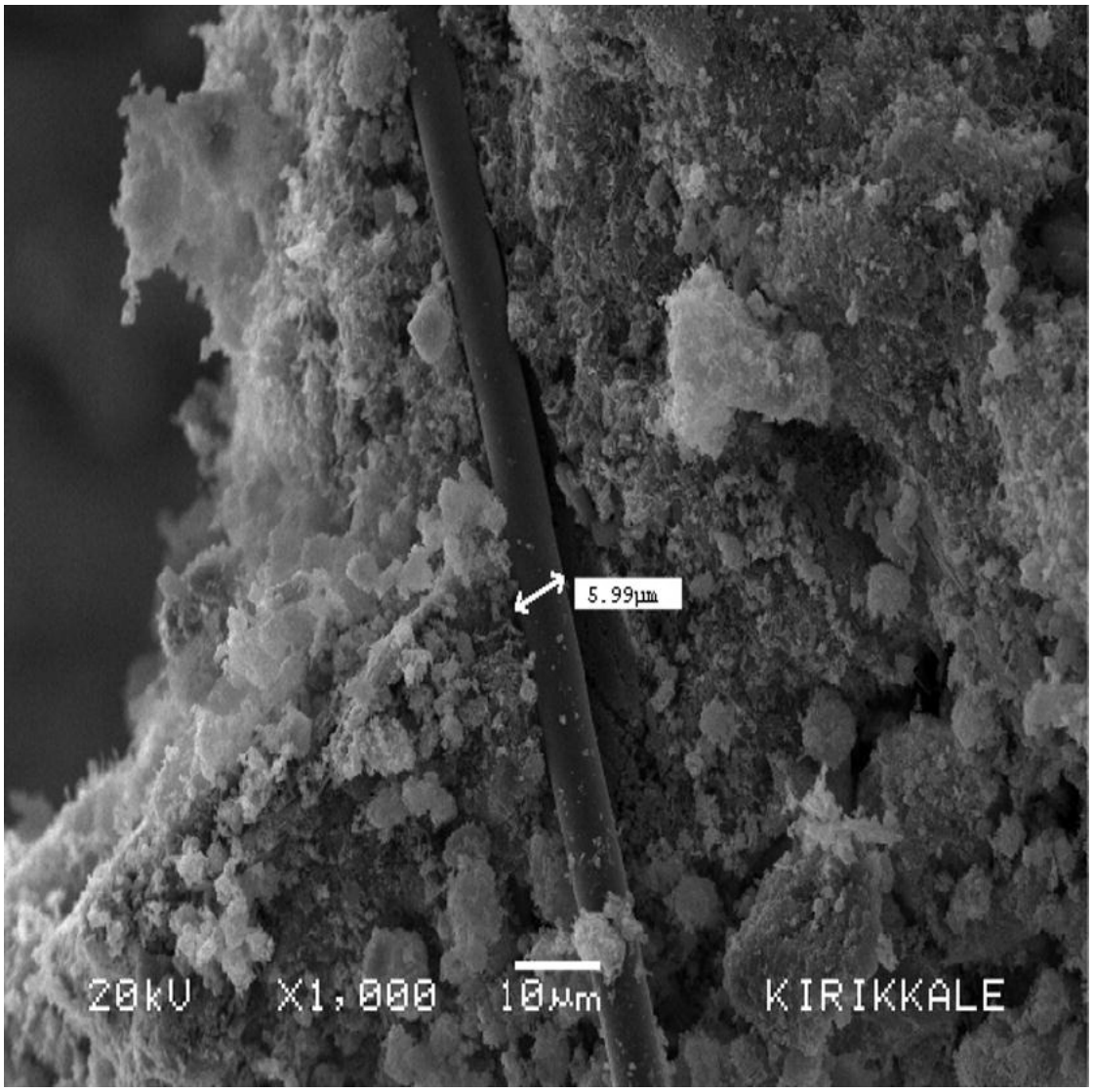
Pooride diameeter mullbetoonis on üldjuhul 0,1 kuni 1 mm ning levinuim meetod nende moodustamiseks on alumiiniumpulbri või pasta lisamine lähtematerjalidele. Alumiiniumpulbrit lisatakse 0,2 kuni 0,5 % sideaine kuivmassist. Alumiinium reageerib kaltsiumhüdroksiidiga, mis vabastab vesinikugaasi, mis omakorda moodustab mullid. [5] Makropoorid, suurusega ligikaudu 10^{-5} kuni 10^{-4} m on sfääri kujuga. Mikropoorid, suurusega ligikaugu 10^{-8} kuni 10^{-7} m moodustuvad materjaliosakeste vahele jäänud õhust.[6]

Autoklaavimise käigus töödeldakse mullbetooni auruga üldjuhul kuni 11 bar rõhu all 14 kuni 18 h temperatuuril 180 kuni 200 □C. Peale autoklaavimist paranevad oluliselt mullbetooni mehhaanilised omadused, nagu survetugevus ja pikaajaline mahukahanemine. [5][7]

1.1.2 Kiudude mõju mullbetooni omadustele

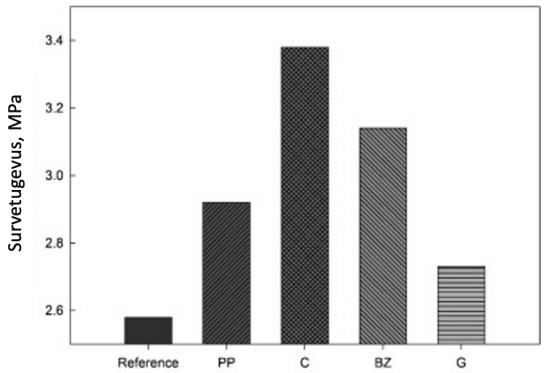
Mullbetoon on võrreldes normaalbetooniga kõrgema soojusisolatsiooni võimega, kuid tugevusnäitajate poolest jääb mullbetoon tugevasti alla normaalbetoonile. Pooride mahu kasvades soojusläbivus langeb, kuid samuti langevad ka painde- ja survetugevus. Tugevuse langust, kui negatiivset mõju ehitusmaterjali tootmisel, saab kompenseerida erinevast materjalist kiudude lisamisega betoonisegule. [8]

Enim kasutatakse mullbetoonis süsinikust, polüpropüleenist, basaldist või klaasist kiude. Erinevates uurimustes on kiude lisatud mullbetoonile kuni 3 % massist.

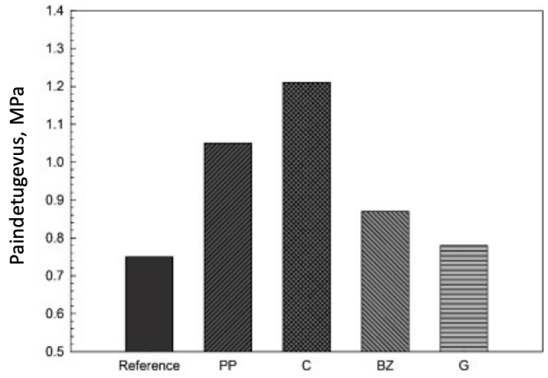


Joonis 1.1 Basaldist kiud mullbetoonis [8]

Kiudude lisamisel on märgatav positiivne mõju mullbetooni surve- ja paindetugevusele, nagu näha alloleval joonisel. Antud katses lisati kõiki tüüpi kiude 0,304 % massist, välja arvatud polüpropüleeni, mida lisati 1,095 % massist.



Joonis 1.2 420 kg/m^3 netokuivtihedusega kiudmullbetooni survetugevused: Reference - ilma kiududeta, PP - polüpropüleen, C - süsinik, BZ - basalt, G – klaas [7]



Joonis 1.3 420 kg/m3 netokuivtihedusega kiudmullbetooni paindetugevused: Reference - ilma kiududeta, PP - polüpropüleen, C - süsinik, BZ - basalt, G - klaas [7]

1.2 Materjali soojuslikud ja niiskuslikud omadused

1.2.1 Materjali soojuslikud omadused ja nende määramine

Soojuserijuhtivus on 1 m paksust ja 1 m^2 pindalaga materjalikihti läbiv soojusvoog vattides, kui temperatuurierinevus pindade vahel on 1 □. Soojusläbivus võtab arvesse ka tarindi paksust, olles soojusvoog, mis läbib 1 m^2 pindalaga tarindit, kui temperatuuride erinevus pindade vahel on 1 □. Soojustakistus on soojusläbivuse pöördväärtus. Materjali soojuslikke omadusi saab arvutada järgnevalt: [1]

$$\lambda = \frac{\phi \cdot d}{A \cdot (\theta_2 - \theta_1)} \tag{1.1}$$

kus λ - soojuserijuhtivus, W/(m · K),

ϕ - soojusvoog läbi 1 m^2 pindala, W,

d – materjalikihi paksus, m,

A – materjalikihi pindala, m^2,

$\theta_2 - \theta_1$ – temperatuuride erinevus pindade vahel, K.

$$U = \frac{\lambda}{d} \tag{1.2}$$

kus U - soojusläbivus, $W/(m^2 \cdot K)$.

$$R = \frac{1}{U} = \frac{d}{\lambda} \tag{1.3}$$

kus R - soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Soojuslikult homogeensetest kihtidest tarindi kogusoojustakistuse saab arvutada järgnevalt : [9]

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 \ldots + R_n + R_{se} \tag{1.4}$$

kus R_{si} – tarindi sisepinna soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$,

R_1, R_2 – iga materjalikihi soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$,

R_{se} – tarindi välispinna soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Soojusmahtuvus on materjali võimekus salvestada soojusenergiat ning seda kirjeldatakse erisoojusega, mis on soojushulk, mis on vajalik materjali massiühiku temperatuuri tõstmiseks 1 □võrra. [1]

$$Q = c \cdot m \cdot (\theta_2 - \theta_1) \tag{1.5}$$

kus Q – salvestatav soojushulk, J,

c – erisoojus, $J/(kg \cdot K)$,

m – keha mass, kg,

$\theta_2 - \theta_1$ – temperatuuri muutus, K.

Materjali soojuserijuhtivust mõõdetakse soojuslevi katsega, mille kõige levinum variant on plaadikatse. Kuiva materjali vastaskülgedele tekitatakse erinevad temperatuurid ning mõõdetakse temperatuurierinevust materjali pindadel ja soojusvoogu läbi materjali. Nendest andmetest saab tuletada soojuserijuhtivuse. Soojusmahtuvuse mõõtmiseks kõige lihtsam viis on veekatse. Kindla temperatuuriga keha asetatakse madalama temperatuuriga vette. Teades vee soojusmahtuvust, saab tuletada uuritava materjali soojusmahtuvuse kui vesi ja katsekeha saavutavad püsiva tasakaalutemperatuuri. [10]

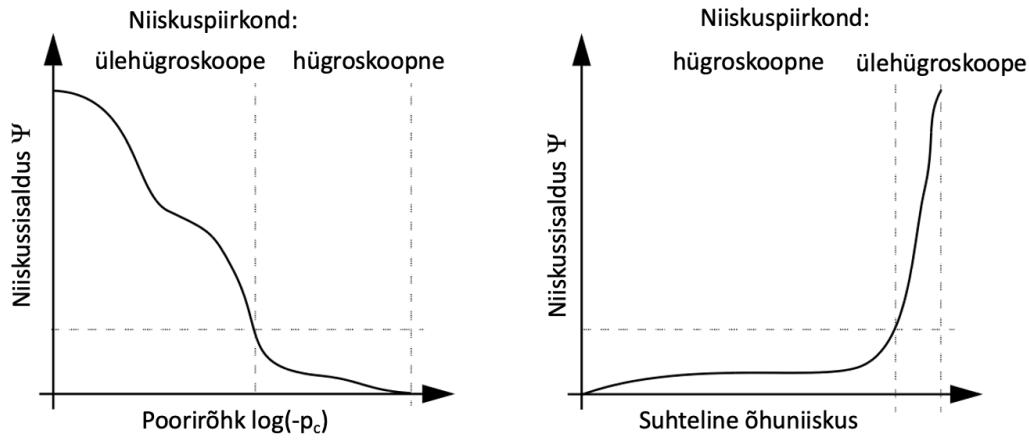
1.2.2 Materjali niiskuslikud omadused

Tasakaaluniiskus

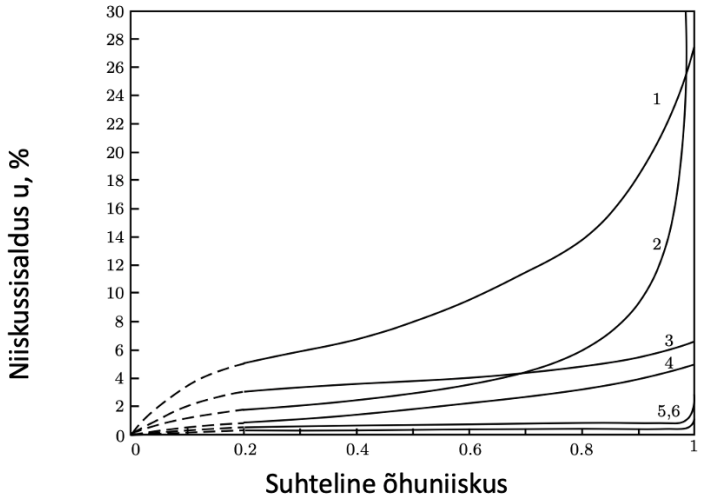
Poorne materjal suudab ümbritsevast õhukeskkonnast imada veeauru ning seda talletada. Niiskuspotentsiaaliks on suhteline õhuniiskus või poorirõhk. Iga suhtelise õhuniiskuse juures saavutab materjal niiskussisalduse, millest edasi ta enam niiskust ei ima, seda niiskussisaldust nimetatakse tasakaaluniiskuseks. Sellisel moel niiskuse imamist nimetatakse adsorptsiooniks ning kuivamist küllastunud kehast desorptsiooniks. [10]

Niiskussisaldused täiesti kuivast kuni küllastunud materjalini jaotatakse kaheks- hügroskoopne ja ülehügroskoopne piirkond. Täpset piiri nende vahel ei ole võimalik tõmmata, kuna need osaliselt kattuvad. Hügroskoopne niiskuspiirkond on suhtelise õhuniiskuse juures kuni 95 % – 98 %. Kui veeauru sisaldav õhk satub kontakti poorse materjali sisepinnaga, ehk poori sisepinnaga, on molekulidevahelised jõud niivõrd suured, et materjali pinnale kinnitub veeauru molekulaarkiht ning mida suurem on potentsiaal, seda rohkem kihte üksteise peale tekib. See protsess algab kõige varem väiksemates poorides. Tasakaalu saavutades hakkavad veemolekulid järjest aurustuma kohtadest, kus nimetatud molekulaarkihte on üks. Samal ajal kondenseeruvad teistesse kohtadesse, kus materjali pind on vaba, uued molekulaarkihid. Seega on materjali pind, kus ei ole veemolekule, konstantne. Materjali vabale pinnale imendunud veemolekulide arv on võrdeline vaba pooripinna pindala ja veeauru osarõhuga. Hügroskoopses niiskuspiirkonnas pidevat vedelat vett poori pinnal veel ei teki ja niiskuslevi toimub peamiselt veeaurujuhtivuse kaudu. [10][6]

Ülehügroskoopne piirkond on 95 % - 98 % suhtelisest õhuniiskusest ülespoole kuni küllastumiseni. Selles piirkonnas hakkab imendunud niiskus moodustama pidevat vedelat vett ning tekib kapillaarkondensaat. Seega domineerib vedela vee juhtivus veeaurujuhtivust. Kahe piirkonna vaheliseks üleminekukohaks saab lugeda seda suhtelist õhuniiskust ja niiskussisaldust, kus sorptsiooni graafik teeb järsu tõusu. [10]

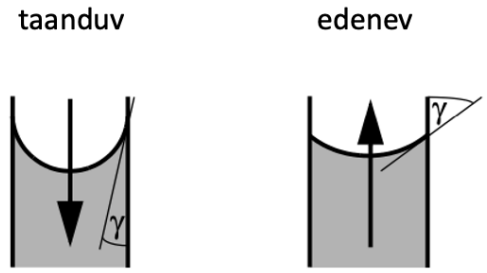


Joonis 1.4 Poorse materjali hügroskoopse ja ülehügroskoopse piirkonna piirid [10]

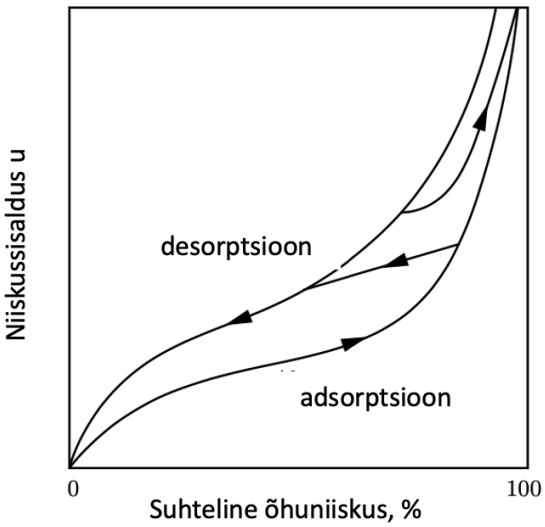


Joonis 1.5 Näited materjalide sorptsioonkõveratest: 1- puit; 2- poorbetoon (500 kg/m^3); 3- paisutatud polüstüreen (31 kg/m^3); 4- betoon (2300 kg/m^3); 5- kivivill (42 kg/m^3); 6- tellis (1890 kg/m^3) [6]

Tasakaaluniiskus desorptsioonil omandab kõrgemad väärtused kui adsorptsioonil. Peamisteks põhjused on: Suured poorid on poorisüsteemiga ühenduses väikeste pooride kaudu ja seega ei saa tühjeneda enne kui väiksed poorid on tühjad; Vett täis poorisüsteemist ei saa õhk väljuda; Kapillaarpooridest väljuva ja siseneva vedeliku kontaktinurgad on erinevad. Antud nähtust nimetatakse tasakaaluniiskuse hüstereesiks. Vedeliku, gaasi ja materjali kokkupuutepinal on molekulidevahelised pinged ning vedeliku ning tahke materjali vaheline kokkupuutenurk ongi eelnevalt mainitud kontaktinurk. Kontaktinurk on üldjuhul märgumisel tunduvalt suurem kui kuivamisel. Tasakaaluniiskuse määramine on täpsemalt kirjeldatud peatükis 2. [10]



Joonis 1.6 Kontaktinurga hüsterees materjali pooris, halliga on tähistatud vedelik ja valgega gaas [10]



Joonis 1.7 Tasakaaluniiskuse hüsterees [6]

Veeaurujuhtivus

Veeauru liikumise potentsiaaliks materjali kahe pinna vahel on veeauru osarõhkude vahe. Veeauru molekulid segunevad kuiva õhu molekulidega nii, et veeauru molekulide kontsentratsioon oleks igas punktis ühtlane. Seega hakkavad veeauru molekulid liikuma suurema kontsentratsiooniga piirkonnast sinna, kus see on madalam. Poorse materjali veeaurujuhtivust mõjutavad õhu veeaurujuhtivus, materjali pooristruktuur ja selle niiskussisaldus. Niiskussisalduse mõju avaldub vedela vee olemasolul, kuna sel juhul poorides olev vesi muudab poorides oleva veeauru sisaldava õhu hulka ning hakkab toimuma vedela vee transport. [10][6]

Nagu eelnevalt mainitud moodustuvad esimesed vee molekulaarkihid juba madalate suhteliste niiskuste juures ning kõige väiksemates poorides võivad need vastaskülgedele moodustunud kihid ühineda. Seega ei saa veeauru transpordi juures arvestada ainult veeauru liikumisega, vaid peab arvesse võtma ka vedela vee olemasolu väikestes poorides. Vedela vee transport materjalis on kiirem kui veeauru transport,

seega kasvab suhtelise õhuniiskuse ja niiskussisalduse kasvuga ka veeaurujuhtivus. Kõrgeima hügroskoopse niiskussisalduse juures saavutavad veega täidetud poorid omavahel kontakti ning hakkab toimuma vedela vee transport materjali ühest punktist teise. Üldise reeglina on materjali veeauruerijuhtivus seda kõrgem, mida kõrgem on tema poorsus. Materjali veeaurujuhtivuse määramine ning kasutatavad ühikud on täpsemalt kirjeldatud peatükis 2. [10][6]

Vedela vee juhtivus

Vedela vee juhtivuse võib antud töö raames jagada kolmeks: veeimavus, kuivamine ning kapillaarne kondensaadi ümberjaotumine. Kuigi nende kolme vahel on teatud erinevused, jääb vedela vee transpordi põhimõte ikkagi samaks.

Vedela vee transpordi potentsiaaliks on poorirõhkude vahe materjali erinevates punktides. Poorirõhku saab defineerida kui pooris oleva vedeliku rõhu ja gaasi rõhu vahet. Seega on poorirõhk kõrgem materjali selles punktis, kus niiskussisaldus on kõrgem. Veemolekulid hakkavad liikuma suurema kontsentratsiooniga materjali osast sinna, kus kontsentratsioon on väiksem, et saavutada molekulide ühtlane jaotus. [10]

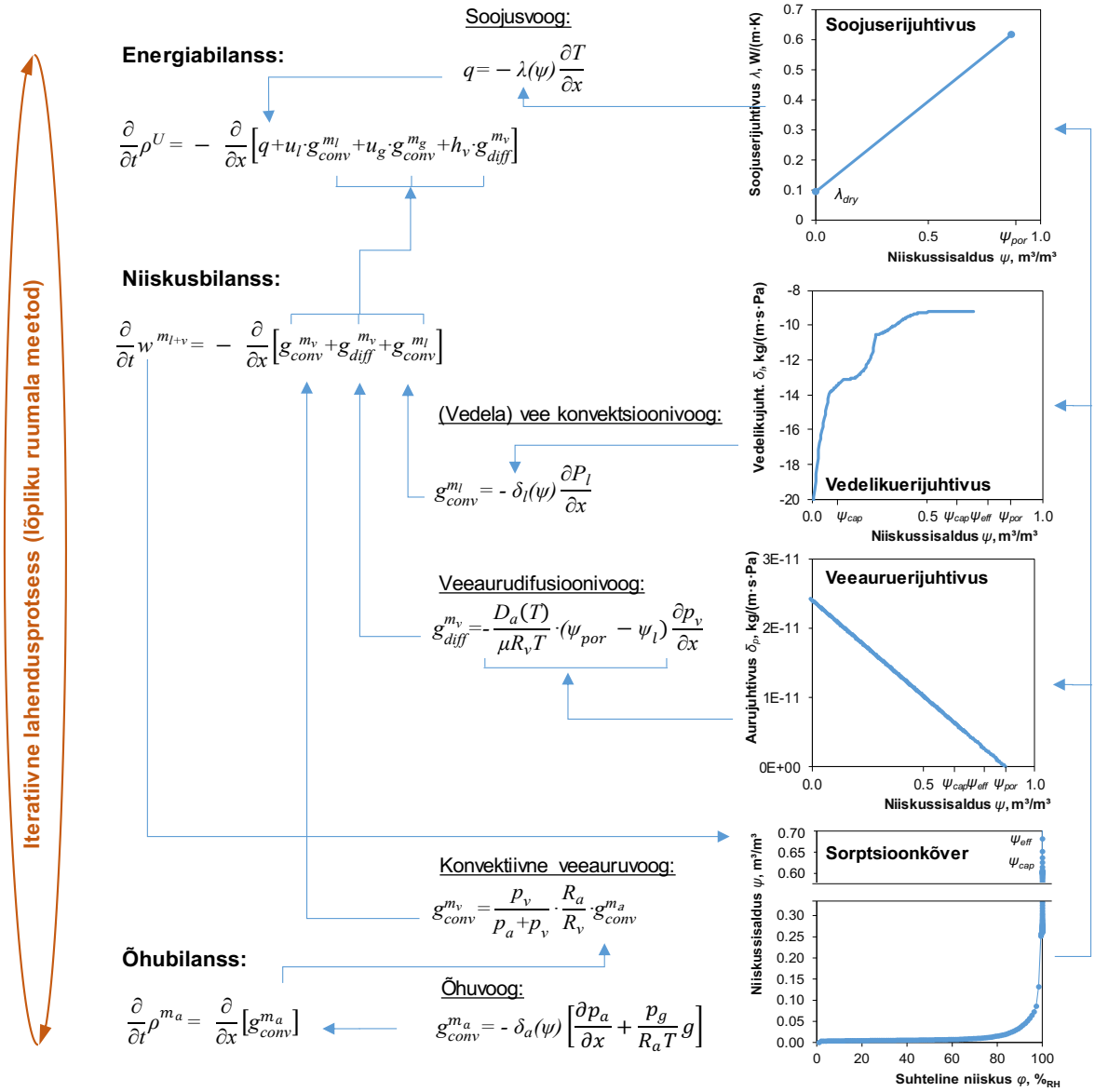
Materjali vedela vee juhtivust mõjutavad oluliselt tema kuivtihedus ja pooristruktuur. Mida suurem on materjali tihedus, seda väiksem on tema veejuhtivus, näiteks küllastunud keha kuivamisel, kuna omavahel ühenduses olevaid poore, kus saaks toimuda vedela vee transport, on vähem.[6][11]

Veeimavus toimub kapillaarjõudude toimel peamiselt väikestes, kapillaarpoorides, mida on suurema tihedusega materjalis rohkem. Seega on üldjuhul poorse materjali veeimavus seda kõrgem, mida suurem on tihedus. [11]

Vedela vee juhtivuse määramine ja kasutatavad ühikud on täpsemalt kirjeldatud peatükis 2.

1.3 Soojuslike ja niiskuslike protsesside modelleerimine tarkvaras Delphin

Programm IBK Delphin kasutab protsesside modelleerimiseks tasakaaluvõrrandeid. Niiskuse-, õhu-, energia- ja ainebilansside diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks kasutab Delphin lõplike mahtude meetodit. Eelmainitud materjaliomadused on aluseks dünaamiliseks soojus- ja niiskuslevi modelleerimiseks ja kokkuvõtlikuna kujutab seda joonis 1.8. [12]



Joonis 1.8 Modelleerimistarkvara IBK Delphin põhimõtteline tööskeem [13]

Olulisemad tähised skeemi põhimõtteliseks mõistmiseks [12]:

q- soojusvoog, W/m^2 ρ^U- siseenergia tihedus elementaarmahus, J/m^3

$w^{m_{l+v}}$- niiskussisaldus elementaarmahus, kg/m^3

ρ^{m_a}- õhu tihedus mahuühikus, kg/m^3

g- üldine tähis voo jaoks, kus indeksid tähistavad järgmist:

l- vedelik *conv*- konvektsioon

g- gaas *diff*- difusioon

v- veeaur *a*- õhk

2. KATSEMETOODIKAD

2.1 Katsetatud materjal

Uuritud materjal on kiudmullbetoon. Tegemist on autoklaavitud poorbetooniga, kuhu on tugevuse tõstmiseks lisatud 3 mm pikad basaltkiud. Kiudmullbetoon toodeti eksperimentaalses laboratooriumis ning katsekehad transporditi TalTechi. TalTechi töötajad materjali tootmisega ei tegelenud. Basaltkiuga armeeritud mullbetooni üheks võimalikuks rakenduseks ehitussektoris on tehaseliselt toodetud suurelemendid, mis ehitusplatsil hoonekehandiks kokku monteeritakse.

Kõiki katseid tehti materjalidega neljast erinevast tootepartiist. Tootja poolt on partiid nimetatud AB5-03, AB5-05, BB5-01 ning DB8-01. Antud nimetuste esimene täht tähistab segu retsepti iteratsiooni ning kolmandal kohal olev number tähistab sihtkuivtihedust, kus 5 näitab sihtkuivtihedust 500 kg/m3 ning 8 näitab sihtkuivtihedust 800 kg/m3. Sihtkuivtiheduse 500 kg/m3 tehtud partiide omavaheline erinevus seisneb tootmisprotsessi tingimuste kontrollituses.

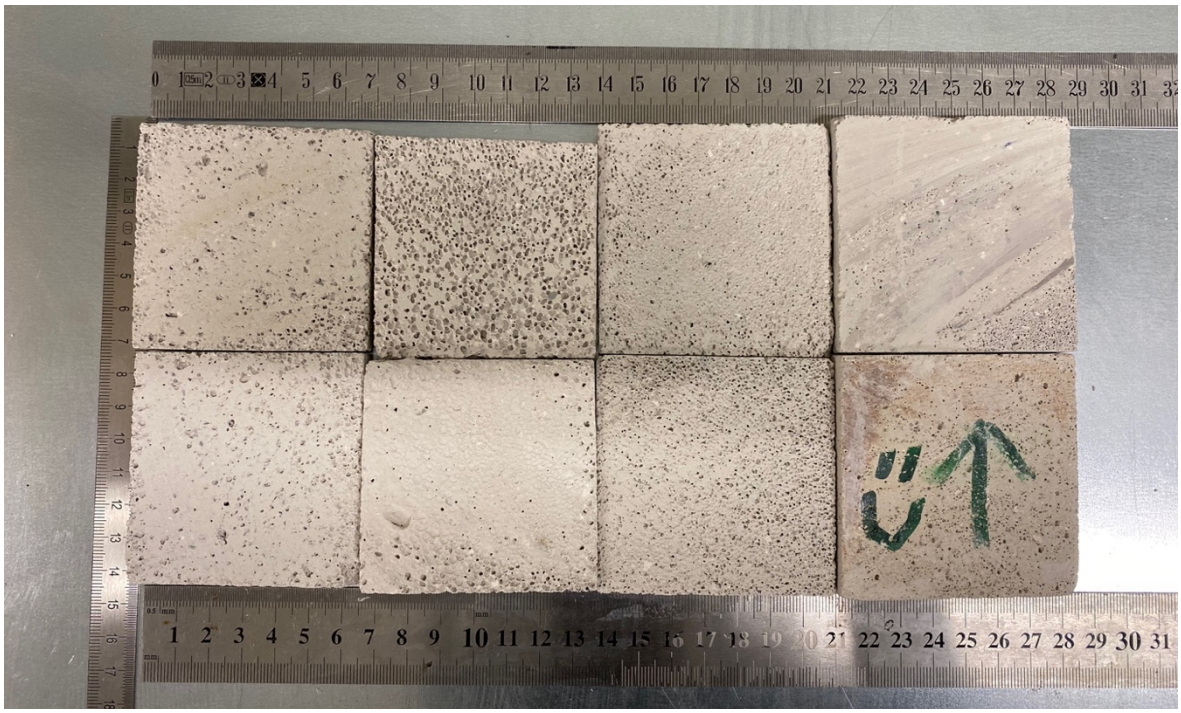
Esmaste mõõtmiste põhjal järeldati, et lisaks tootepartiide vahelistele tiheduse ja poorsuse erinevustele, esines märgatav kõikumine ka partii siseselt. Kõikide katsete jaoks valiti igast partiist võimalikult erineva tihedusega katsekehi, et saada võimalikult esinduslikud tulemused.



Joonis 2.1 Poorsuse erinevus AB5-05 ja DB8-01 partiide vahel



Joonis 2.2 Poorsuse ebaühtlus sama partii katsekehade vahel, fotol kaks proovikeha AB5-03 partiist

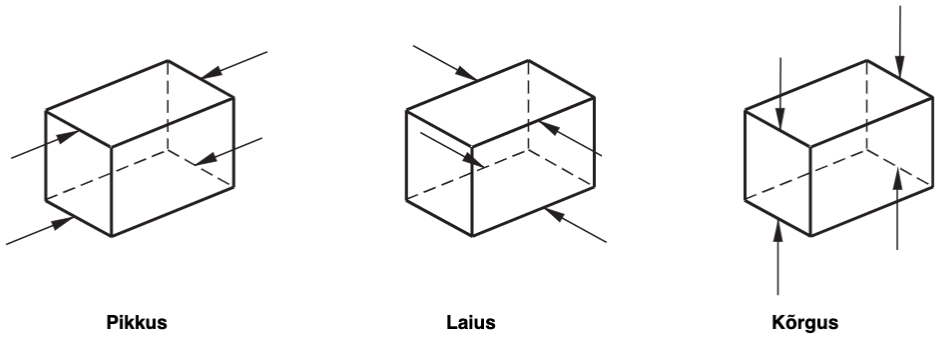


Joonis 2.3 Poorsuse erinevus partii siseselt ja partiide vaheliselt, vasakult paremale: AB5-03, AB5-05, BB5-01 ning DB8-01

2.2 Netokuivtihedus ja poorsus

Saamaks teada materjali netokuivtiheduse mõju materjali omadustele, määrati enne iga katse algust eraldi iga katsekeha netokuivtihedus. Katsekeha kuivmassi m_0 määramiseks kuivatati katsekeha ventileeritavas kuivatuskapis temperatuuril 50 □C □ 0,4 □C püsiva massini. Mass loetakse konstantseks, kui kolme vähemalt 24 h vahega tehtud mõõtmise tulemusel on massikadu vähem kui 0,1 % kogumassist. [14] Kuivmass m_0 määrati täpsusega 0,001 g ning registreeriti.

Järgmiseks määrati katsekehade mõõtmed. Kõik proovikehad olid sirgete servadega risttahukad ning kehade pikkus, laius ja kõrgus mõõdeti elektroonilise nihikuga täpsusega 0,01 mm vastavalt joonisele Joonis 2.4



Joonis 2.4 katsekehade mõõtmete määramine [15]



Joonis 2.5 Katsekehade mõõtmete määramiseks kasutatud seade

Lisaks joonisel Joonis 2.4 näidatud mõõtudele, määrati nii pikkuse, laiuse kui kõrguse puhul ka kolmas mõõt standardis nõutud punktide keskelt. Iga katsekeha pikkus *l*, laius *w*, ning kõrgus *h* arvutati kolme mõõtmistulemuse keskmisena ning esitati täpsusega 0,1 mm. Netomaht *V* esitati täpsusega 1 mm^3.

Netokuivtihedus arvutati valemiga: [14]

$$\rho_0 = \frac{m_0}{\mathrm{V}} \cdot 10^6 \tag{2.1}$$

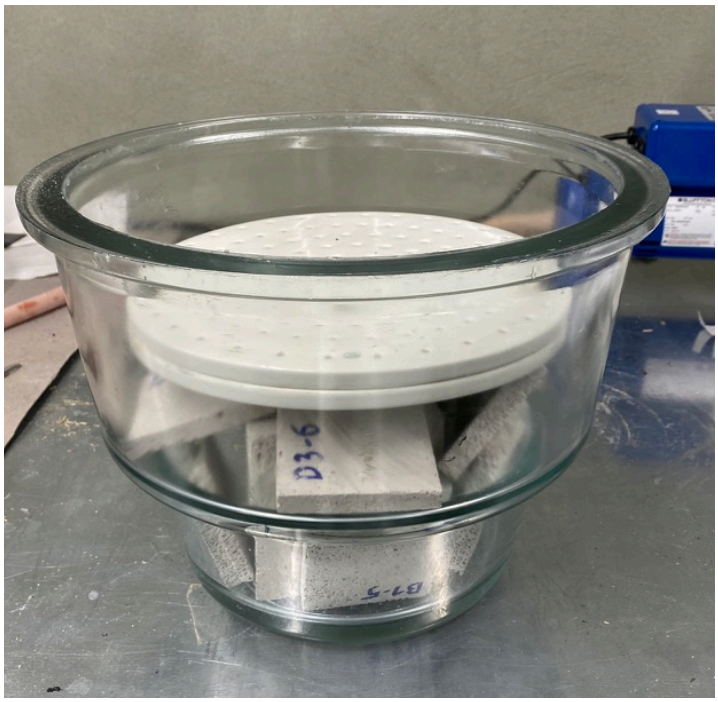
kus ρ_0 – netokuivtihedus, kg/m^3,

m_0 – kuivmass, g,

V – netomaht, mm^3.

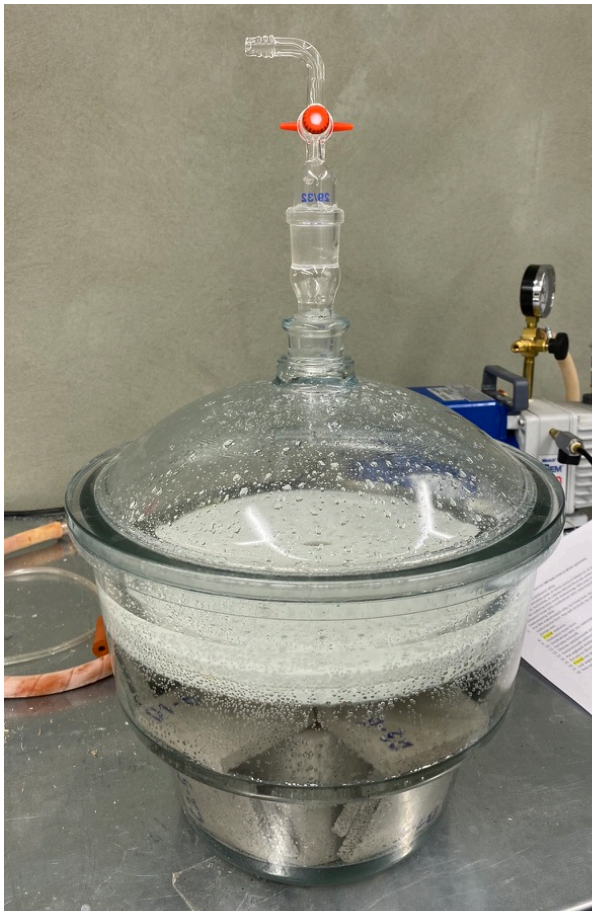
Netokuivtihedus esitati täpsusega 1 kg/m^3.

Poorsuse leidmiseks kõigepealt küllastati katsekehad vaakumeksikaatoris destilleeritud veega. Eelnevalt kuivatatud ja kaalutud katsekehad asetati kuiva eksikaatori põhja nii, et kehade omavaheline kokkupuutepind oleks võimalikult väike ning kehade peale asetati raskuseks rõhuplaadimasina keraamiline plaat.



Joonis 2.6 Katsekehad vaakumeksikaatoris

Seejärel suleti eksikaatori kaas vaakummäärdega ning ühendati vaakumpumbaga. Vaakumpumba abil imeti eksikaatorist õhk välja, et tekiks alarõhk ja katsekehade pooridest saaks õhu maksimaalselt välja. Eksikaatorisse tekitati rõhk suurusega 10 kuni 30 mbar ning seda hoiti vähemalt 24 h. Seejärel ühendati eksikaator destilleeritud vee anumaga ja lasti aeglaselt, umbes 5 cm/h, eksikaatoril veega täituda kuni kõik kehad olid umbes 5 cm ulatuses vee all.



Joonis 2.7 Katsekehad vaakumeksikaatoris vee all; eksikaatori kraan on suletud ja eksikaatoris on endiselt alarõhk

Peale 24 h vees olemist avati eksikaatori kraan, ehk lasti sinna normaalrõhul õhk, mis omakorda surus vee alarõhus olevatesse pooridesse. Kindluse mõttes hoiti kehi veel 24 h vees, misjärel kehad kaaluti. Poorsuse mõõtmiseks kaaluti kehi ka vees.

Kaalumiste põhjal arvutati keha ruumala järgmise valemiga [16]:

$$V_0 = \frac{m_w - m_i}{\rho_w \cdot 1000} \tag{2.2}$$

kus V_0 – arvutatud netomaht, mm^3,

ρ_w – vee tihedus, kg/m^3,

m_w – veega küllastatud keha mass õhus, g,

m_i – veega küllastatud keha mass vees, g.

Materjali avatud poorsus arvutati järgmise valemiga [16]:

$$\mathrm{p} = \frac{m_w - m_0}{V_0 \cdot 10^6} \cdot 100 \tag{2.3}$$

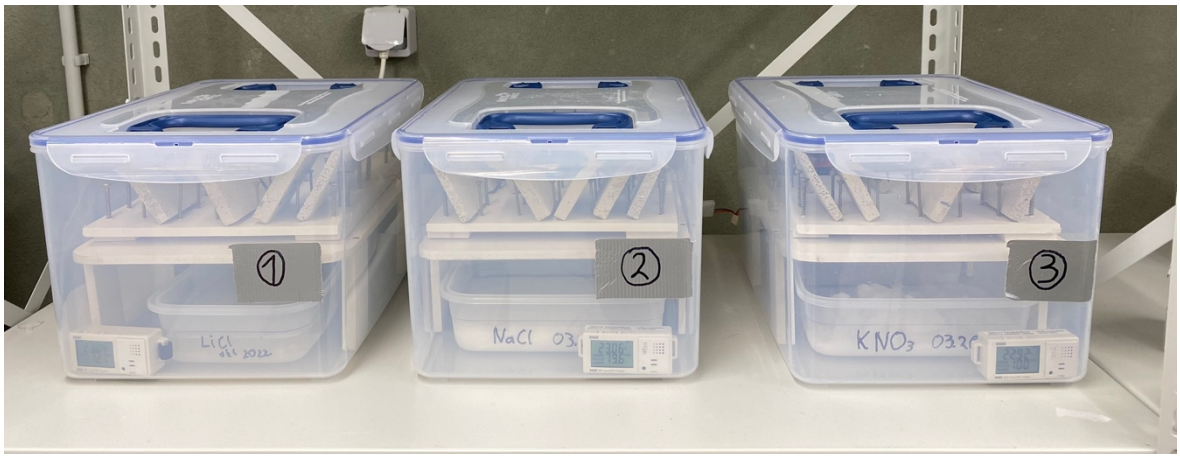
kus p – avatud poorsus, %.

2.3 Tasakaaluniiskus

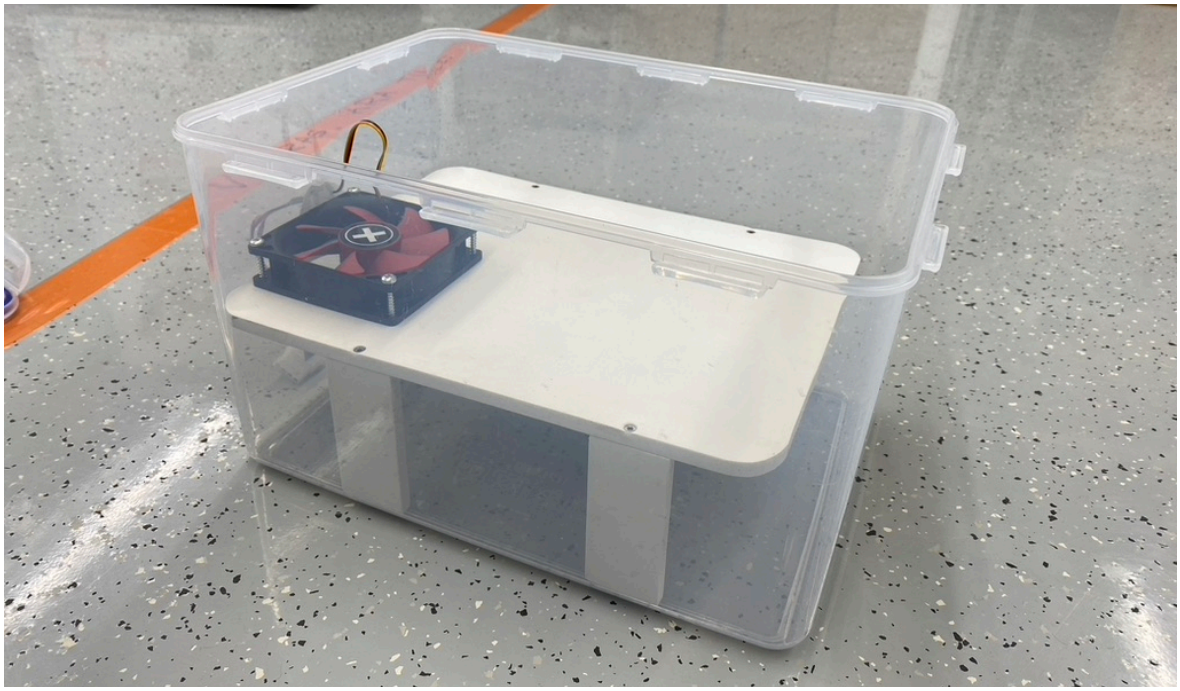
2.3.1 Tasakaaluniiskus hügroskoopses piirkonnas

Hügroskoopses piirkonnas tasakaaluniiskuse katse eesmärk on leida materjali niiskussisaldus erinevate suhteliste õhuniiskuste (RH) juures. Tasakaaluniiskused määrati nii adsorptsioonil kui desorptsioonil seitsme erineva RH juures. Katsekehad olid risttahukad küljepikkustega ligikaudu 66 kuni 73 mm ning kõrgustega ligikaudu 6-16 mm. Enne katset määrati iga proovikeha netokuivtihedus.

Püsiva temperatuuriga 23 □C ruumis asuvatesse õhukindlatesse kambritesse asetati anumad küllastunud soola-vesi-lahustega, mille kohal asuvale plaadile toetati katsekehad. Kiirema niiskustasakaalu saavutamiseks, pandi kambrisse ventilaator, mis kiirendas õhu liikumist.



Joonis 2.8 Katsekehad tasakaaluniiskuse kambrites



Joonis 2.9 Tsakaaluniiskuse katse kamber

Igas kambris saavutati soovitud RH väärtus erineva soola küllastunud vesilahusega. Anuma põhja pandi 1,5 kuni 4 cm paksune soolakiht, millele hakati väikeste koguste kaupa, pidevalt segades, lisama vett, kuni saavutati küllastunud lahus. Küllastunud lahuse tunnuseks on vaba vee olemasolu, kuid liigse vee kogus tuleks hoida minimaalsena, et temperatuuri kõikudes oleks kambris suhteline õhuniiskus võimalikult stabiilne. [17] Katses kasutatud soolad ning neile vastavad RH väärtused 23 □C juures on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Katses kasutatud soolad ja nendele vastav suhtelise õhuniiskuse väärtus [18]

Sool	RH küllastunud vesilahuse puhul 23 □C juures
LiCl	11,30 □ 0,28
$KC_2H_3O_2$	22,75 □ 0,30
K_2CO_3	43,16 □ 0,36
NaCl	75,36 □ 0,13
KCl	84,65 □ 0,27
KNO_3	94,00 □ 0,60
K_2SO_4	97,42 □ 0,47

Tasakaaluniiskuse leidmisel adsorptsioonil alustati katset kuivade katsekehadega, desorptsiooni puhul alustati katset proovikehadega, mis olid veega küllastunud. [19] Katsekehade destilleeritud veega küllastamiseks kasutati vaakumeksikaatorit.

Nii adsorptsioon-, kui desorptsioonkõvera määramiseks tehtud katsete puhul olid proovikehad kambrites kuni niiskustasakaalu saavutamiseni. Niiskustasakaal on

saavutatud, kui kõik katsekehad ühes keskkonnas on saavutanud püsiva massi. Mass loetakse konstantseks, kui kolme vähemalt 24 h vahega tehtud mõõtmise tulemusel on massimuut vähem kui 0,1 % kogumassist. [18] Kui niiskustasakaal oli saavutatud, arvutati kõikide kehade niiskussisaldused. Kaalumised tehti täpsusega 0,001 g.

Niiskussisaldus massi järgi arvutati valemiga: [14]

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \tag{2.4}$$

kus u – niiskussisaldus, %,

m – katsekeha mass katse lõppedes, g.

Niiskussisaldus massi ja mahu järgi arvutatakse valemiga: [14]

$$w = u \cdot \rho_0 \tag{2.5}$$

kus w – niiskussisaldus, kg/m^3.

Niiskussisaldus mahu järgi arvutatakse valemiga: [14]

$$\Psi = u \cdot \frac{\rho_0}{\rho_w} \cdot 100 \tag{2.6}$$

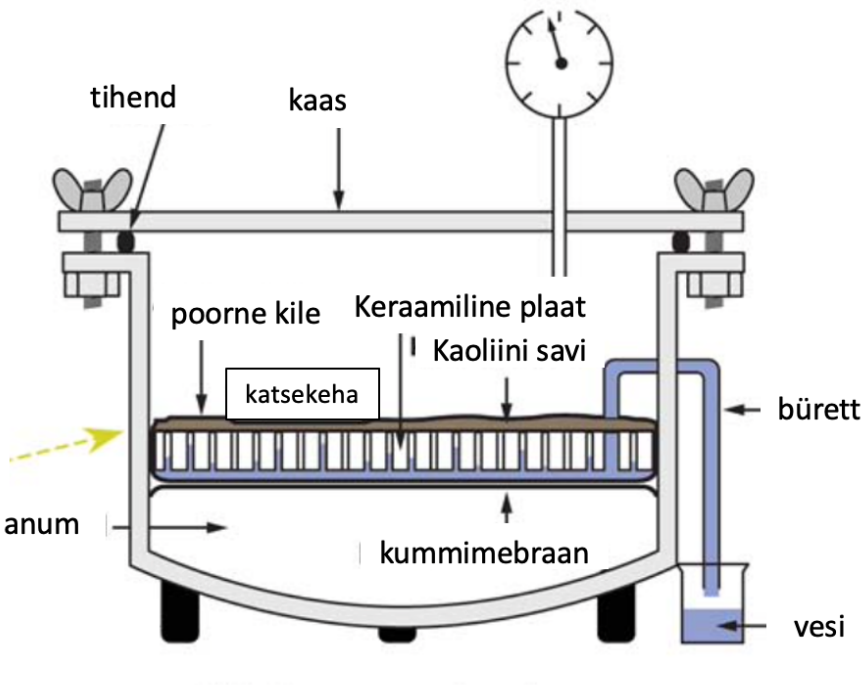
kus Ψ - niiskussisaldus, %,

ρ_w – vee tihedus, kg/m^3.

2.3.2 Tasakaaluniiskus ülehügroskoopses piirkonnas

Leidmaks materjali niiskussisaldust ülehügroskoopses piirkonnas, kasutati rõhuplaadi katset ja kastepunktipsühromeetri katset. Erinevalt hügroskoopse piirkonna tasakaaluniiskuse jaoks kasutatud kliimakambritega katsest, saab kõrge suhtelise õhuniiskuse (umbes 95-100%) jaoks kasutataval rõhuplaadi katsetel leida niiskustasakaalu ainult desorptsioonil. [20]

Rõhuplaadi masin koosneb terasest anumast, mille kaas on tihendiga ning on võimeline hoidma õhurõhku, poorsest keraamilisest plaadist, rõhu tekitamise süsteemist ning keraamilise plaadi alt vee väljavoolu süsteemist koos büretiga. Rõhu tekitamiseks kasutati lämmastikku.

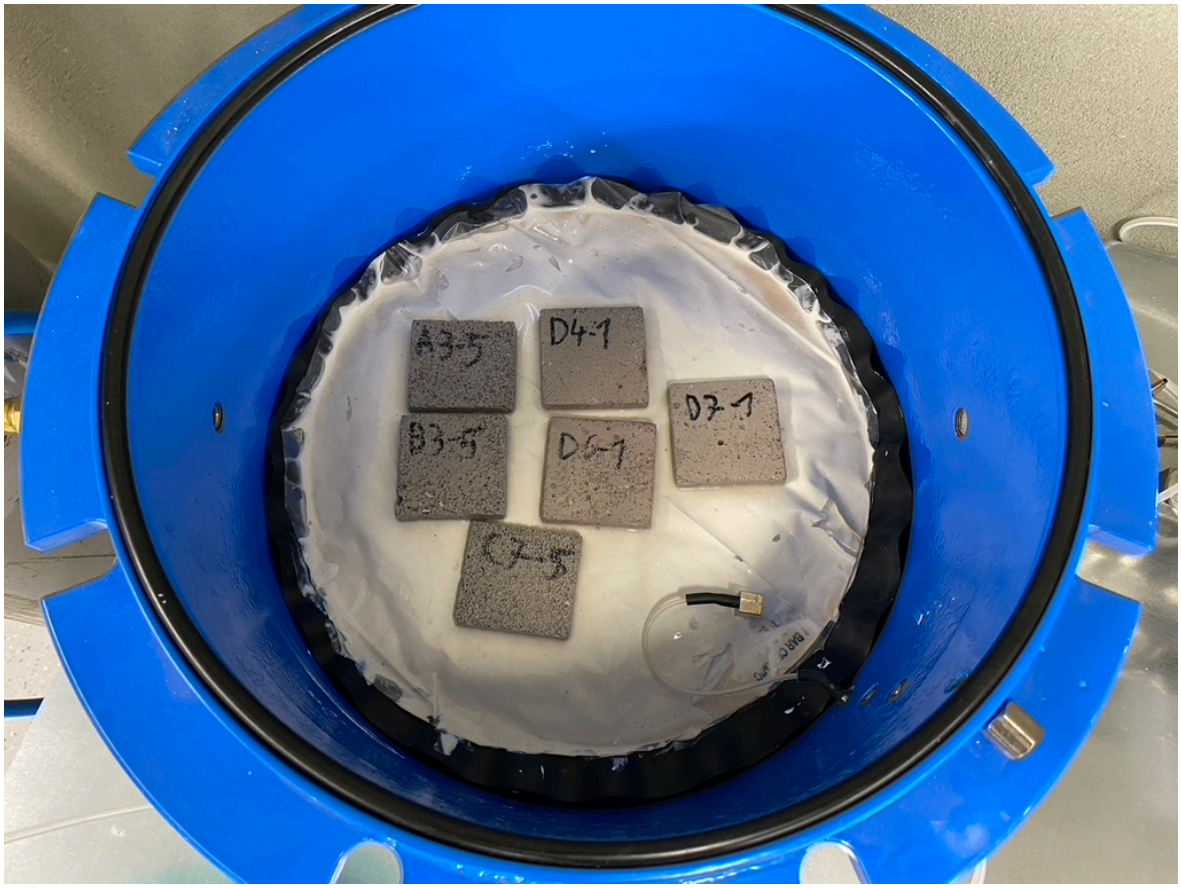


Joonis 2.10 Rõhuplaadi masina skeem [20]



Joonis 2.11 Rõhuplaadimasin

Enne katset määrati iga katsekeha netokuivtihedus ning seejärel küllastati kehad destilleeritud veega vaakumeksikaatoris. Rõhuplaadi masina keraamiline plaat küllastati enne katset vees leotades. Küllastunud plaadile määriti kaoliini savi pasta, mille valmistamiseks segati 125 g pulbrit 150 g destilleeritud veega ning mis kaeti poorse kilega, et vältida savipasta kleepumist katsekeha külge. [20] Katsekehad vajutati kile peale nii, et tekiks ühtlane kontakt pastaga.



Joonis 2.12 Katsekehad rõhuplaadi masinas

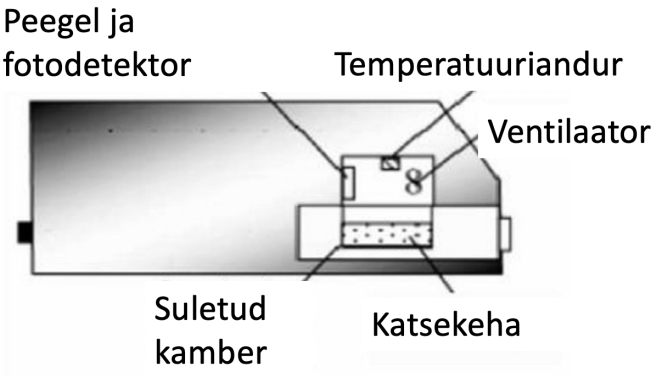
Keraamiline plaat koos katsekehadega asetati anumasse, kuhu tekitati kindel õhurõhk. Kõrgem õhurõhk hakkas katsekehast vett läbi keraamilise plaadi välja pressima ning väljunud vee kogust mõõdeti. Niiskustasakaal loetakse saavutatuks kui 48 h jooksul väljub vähem kui 0.05 ml vett. [20] Kui niiskustasakaal oli saavutatud, lasti masinast õhurõhk välja ning kaaluti kehad täpsusega 0,001 g ja arvutati niiskussisaldus vastavalt valemitele 2.4, 2.5 ning 2.6.

Peale katsekehade kaalumist niisutati uuesti savipasta, asetati katsekehad plaadile tagasi ning korrati katset järgmise õhurõhu väärtusega. Kui savipasta ei olnud enam kasutuskõlblik, segati valmis uus segu. Vastavalt seadme tootja juhistele kasutati erineva õhurõhu jaoks erinevaid keraamilisi plaate. Igale plaadile on määratud vastupanu õhurõhule, ehk kui kõrge rõhu korral õhk plaadist läbi ei lähe. [10]

Saamaks teada tasakaaluniiskust kindla suhtelise õhuniiskuse juures, tuli seadmesse tekitatud õhurõhk teisendada suhtelise õhuniiskuse väärtuseks. [20]

Tasakaaluniiskust ülehügroskoopses piirkonnas saab mõõta ka kastepunktipsühromeetriga. Seadme tööpõhimõte seisneb katsekehas oleva vedela vee ja katsekeha kohal oleva õhus sisalduva veeauru tasakaalul. Katsekeha asub seadme sees mõõtekambris. Jahutatud peegli abil mõõdetakse kambris oleva õhu kastepunkti

temperatuur ning infrapunatermomeetriga mõõdetakse katsekeha temperatuur ja nende põhjal arvutatakse suhteline niiskus.[21]



Joonis 2.13 Kastepunktipsühromeetri skeem [22]

Nagu ka rõhuplaadi katsel, mõõdeti tasakaaluniiskust desorptsioonil, seega alustati katset eksikaatoris küllastunud kehadega. Katsekeha paksusega umbes 6 kuni 7 mm kuivatati sobiva niiskussisalduseni ning asetati seejärel seadme katsekambrisse. Kui tasakaal katsekehas oleva vedela vee ning õhus oleva veeauru vahel oli saavutatud, määrati seadmega suhteline õhuniiskus. Seadme abil on võimalik määrata ka materjali niiskussisaldust, kuid antud tulemus ei ole päris täpne, sest tasakaalustumise jooksul kuivab teatud kogus vett materjalist välja. Seega täpsema tulemuse saab, kui enne katsekeha masinasse asetamist määrata niiskussisaldus kaalumise teel.[22] Katsekehad kaaluti täpsusega 0,001 g ning niiskussisaldus määrati vastavalt peatükis 2.3.1 toodule.



Joonis 2.14 Katsekeha kastepunktipsühromeetri seadmes

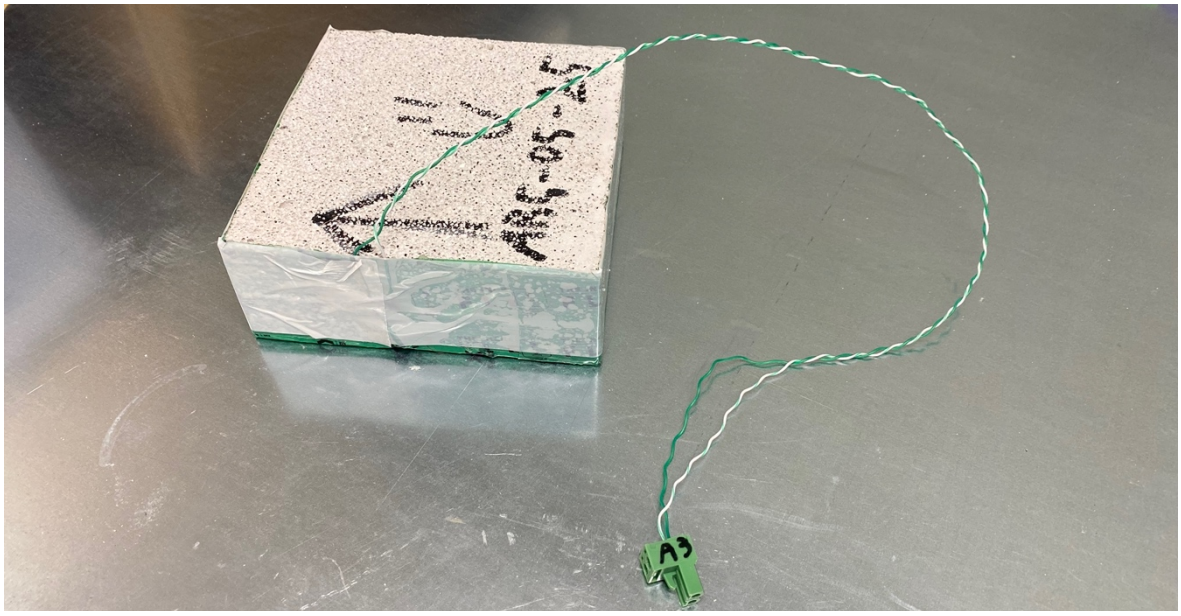
2.4 Kapillaarne kondensaadi ümberjaotumine

Kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse eesmärk on uurida kuidas kondenseerunud vesi liigub materjalis vastupidises suunas veeaurule. Ühel pool katsekeha oli niiske ja soe ruumiõhk temperatuuriga 25 □C ning suhtelise õhuniiskusega 55 % ning teisel pool külmaplaat temperatuuriga 5 □C. Veeaurujuhtivus toimub sel juhul soojemalt poolelt külmale, aga kapillaarne juhtivus viib vedelat vett teises suunas, tuues esile niiskuse ümberjaotumise.[23]

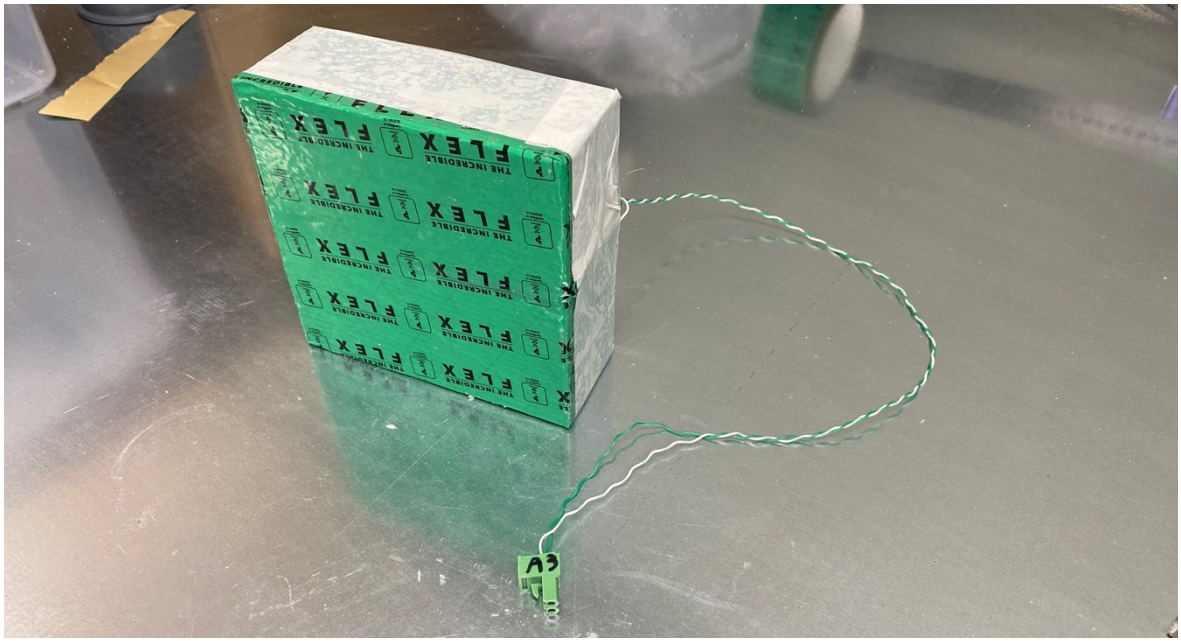
Katse alguses määrati kõikide katsekehade netokuivtihedused. Proovikehadele mõõtudega 130x130x50 mm lisati põhja peale freesitud soonde temperatuuriandur ning põhi ja küljed kaeti polüetüleenteibiga, vältimaks niiskuslevi nendest tahkudest. Lisaks kaeti küljed kileteibiga, et vältida katsekehade kleepumist soojustuse külge.



Joonis 2.15 Temperatuuriandur asetatud katsekeha põhjale freesitud soonde

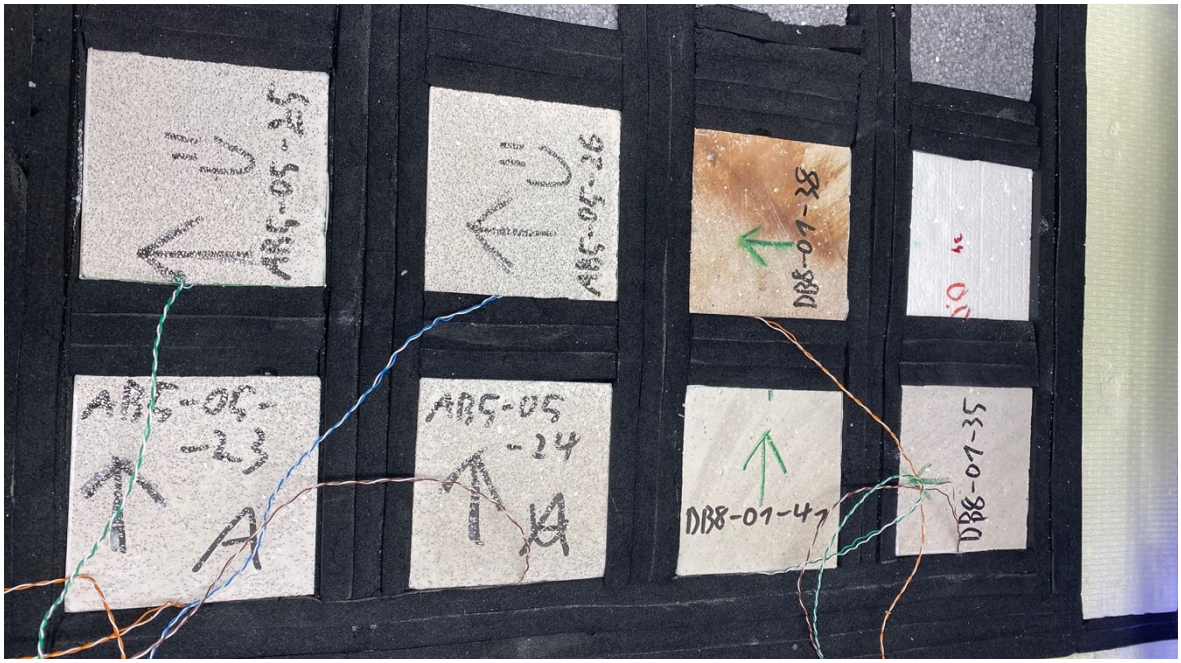


Joonis 2.16 Ettevalmistatud katsekeha

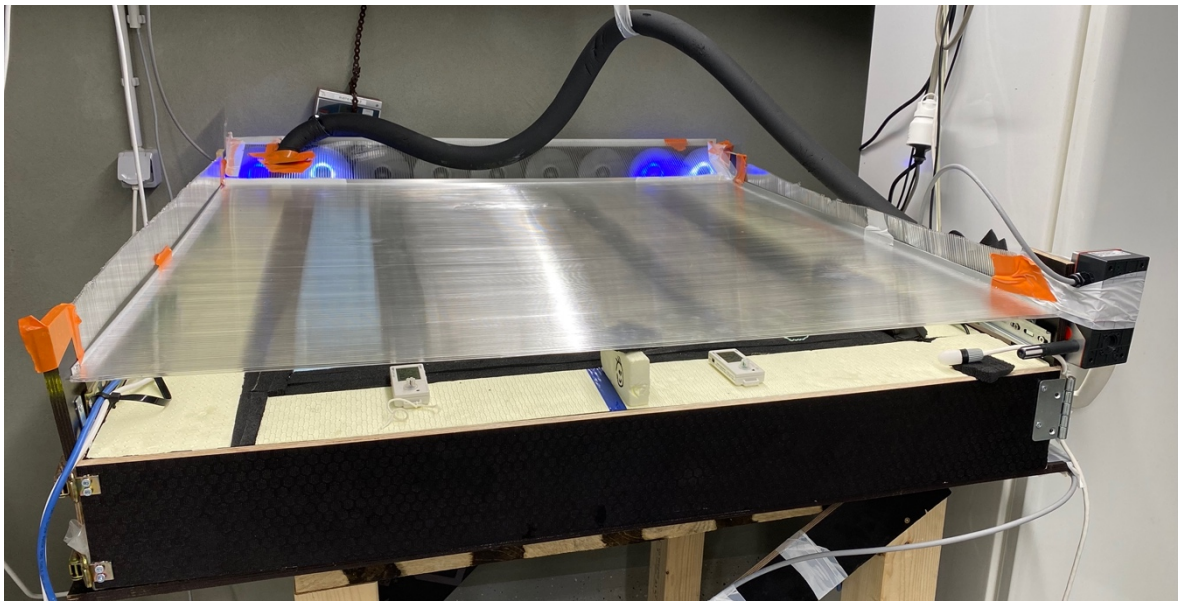


Joonis 2.17 Ettevalmistatud katsekeha

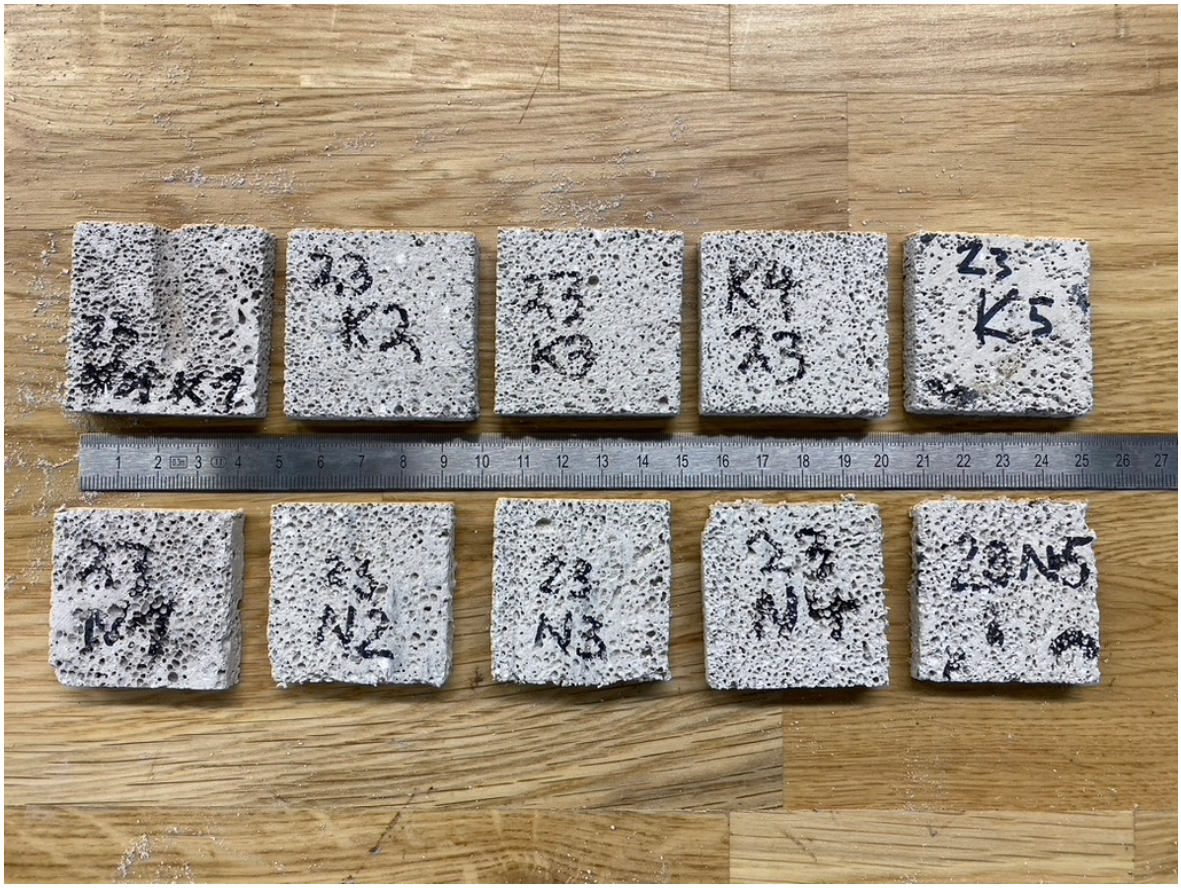
Seejärel asetati proovikehad katseseadmele, milleks on vesijahutusega plaat temperatuuriga 5 □C. Katsekehad eraldati teineteisest Armaflex elastomeerse vahuga ning ventilaatoritega tekitati kehade kohale õhuvool, et kiirendada katse käiku. Katsekehi kaaluti regulaarselt ning katse lõppedes eemaldati katsekehad plaadilt, kaaluti ning tükeldati 8-12 mm paksusteks viiludeks, mis omakorda kaaluti. Lõigatud viilud kaaluti täpsusega 0,001 g, kuivatati püsiva massini ning määrati nende niiskussisaldus vastavalt peatükis 2.3.1 toodule. [24]



Joonis 2.18 Proovikehad katseseadmel



Joonis 2.19 Katseseade, kus katsekehade kohale on asetatud plaat soodustamaks õhuvoolu ja plaadi all on temperatuuri ning suhtelise õhuniiskuse andur

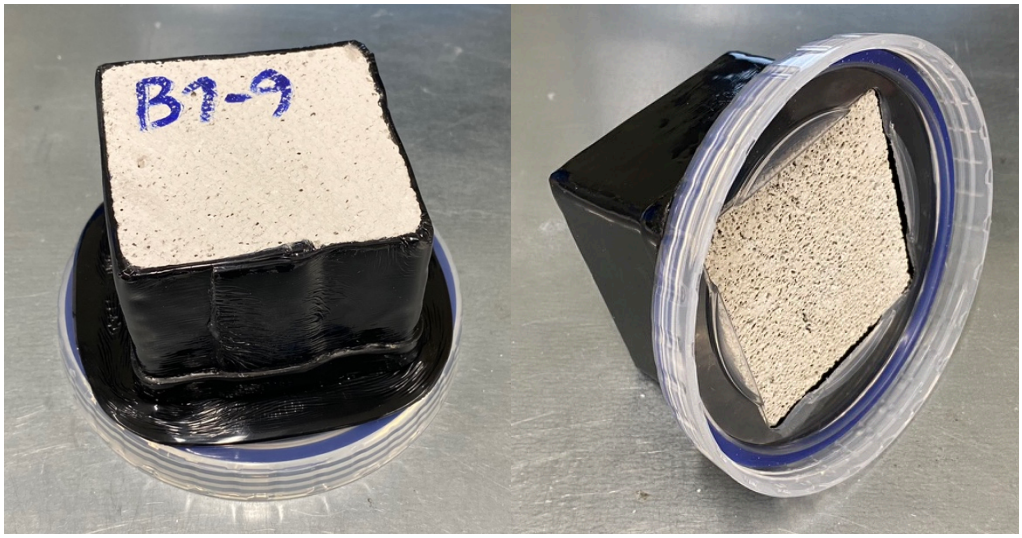


Joonis 2.20 Viilutatud katsekehad, kusjuures märgistus K tähendab katsekeha keskelt tehtud lõiget ning N tähistab nurgast tehtud lõiget

2.5 Veeaurujuhtivus

2.5.1 Isotermiline topsikatse

Isotermilise topsikatse eesmärk on mõõta materjali veeaurujuhtivuse omadusi tingimustes, kus temperatuur mõlemal pool katsekeha on sama. Enne katset määrati 65x65x50 mm mõõtudega katsekehade täpsed mõõtmed ning netokuivtihedused. Kehade küljed kaeti butüülteibiga, vältimaks niiskuslevi külgpindade kaudu, ning kinnitati topsikaane külge nii, et keha alumine tahk oli tasapinnaliselt kaanega.



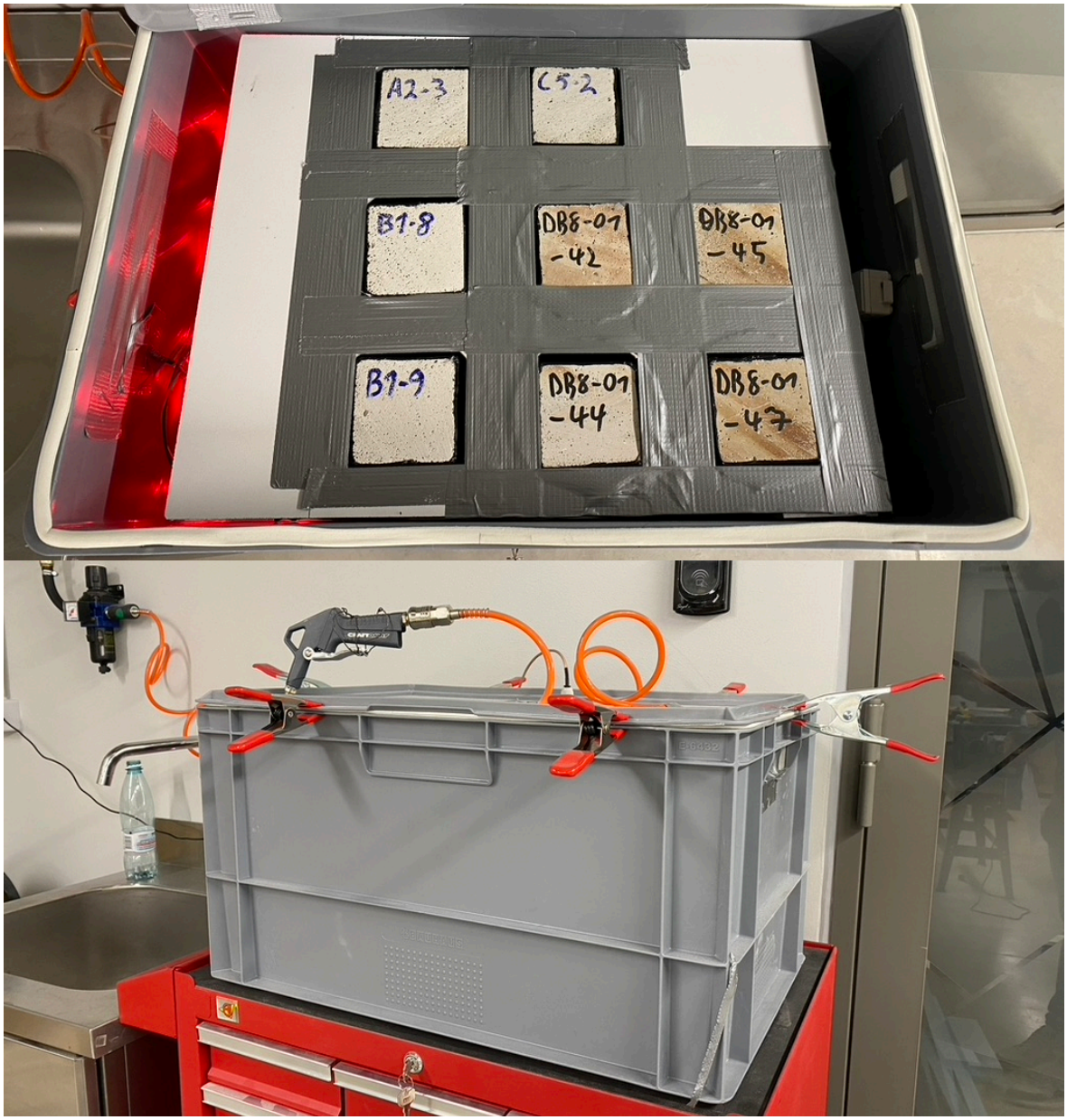
Joonis 2.21 Veeaurujuhtivuse katse jaoks ettevalmistatud katsekeha

Vastavalt standardile EVS-EN ISO 12572:2016 keerati sellisel kujul kaaned õhutihedalt topsidele, kuhu oli ette valmistatud vähemalt 15 mm paks küllastunud soola-vesi-lahus nii, et lahuse ja katsekeha alumise pinna vahele jäi umbes 15 mm paksune õhuvahe. Isotermilist topsikatset tehti kahes erinevas suhtelise õhuniiskuse vahemikus.

Tabel 2.2 Isotermilise topsikatse ääretingimused

Katse	**Temperatuur, °C**	**Tingimus topsis**	**Tingimus väljas**
Kuiv tops	22,5	Kaaliumatsetaat, 23 % RH	Rõhu all kuivatatud õhk, 3 % RH
Märg tops	26	K_2SO_4, 97 % RH	KCl, 84 % RH

Tabelis toodud temperatuurid ja suhtelised niiskused on ligikaudsed. Arvutustes kasutati temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite kaudu saadud teavet. Kuiva topsi katse jaoks asetati topsid tihenditega suletud plastmasskasti, milles olid õhuringluse jaoks ka ventilaatorid. Kasti külge ühendati suruõhuvoolik, mis puhus kasti kuiva õhku.



Joonis 2.22 Katseseade, millega tekitati kasti 3 % suhtelist õhuniiskust

Märja topsi katse puhul asetati samasugused katsekehad välja lülitatud külmkappi, kuhu oli tekitatud tabelis 2.2 mainitud keskkond ning õhuringluse parandamiseks lisatud ventilaatorid.

Katsekehi koos topsiga kaaluti regulaarselt täpsusega 0,001 g kuni difusioonitakistustegur saavutas stabiilse väärtuse ning tehti arvutused vastavalt standardile EVS-EN ISO 12572:2016. [25]

Veeauruvoog läbi katsekeha arvutati valemiga:

$$g = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot A} \tag{2.7}$$

kus g- veeauruvoog läbi katsekeha, kg/(m^{2}s),

Δm – kahe kaalumise masside vahe, kg,

Δt – kahe kaalumise ajavahe, s,

A- katsekeha pindala, m^2.

Materjali veeaurujuhtivus arvutati valemiga:

$$W = \frac{g}{\Delta p_v} \tag{2.8}$$

kus W- materjali veeaurujuhtivus, kg/(m^2 ·s·Pa),

Δp_v- veeauru osarõhkude vahe katsekeha eri pindade vahel, Pa.

Veeauru osarõhk arvutati valemiga:

$$p_v = \phi \cdot 610{,}5 \cdot e^{\frac{17{,}269 \cdot \theta}{237{,}3+\theta}} \tag{2.9}$$

kus p_v- veeauru osarõhk, Pa,

ϕ- suhteline õhuniiskus, %,

θ- temperatuur, □C.

Materjali veeauruerijuhtivus arvutati valemiga:

$$\delta = W \cdot d \tag{2.10}$$

kus δ- materjali veeauruerijuhtivus, kg/(m·s·Pa),

d- katsekeha paksus, m.

Materjali difusioonitakistustegur arvutati valemiga:

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta} \tag{2.11}$$

kus □- materjali difusioonitakistutegur,

δ_{air}- seisva õhu veeauruerijuhtivus, kg/(m·s·Pa).

Seisva õhu veeauruerijuhtivus arvutati valemiga:

$$\delta_{air} = \frac{0{,}086 \cdot p_0}{R_d \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1{,}81} \tag{2.12}$$

kus p_0- normaalõhurõhk, 101325 Pa,

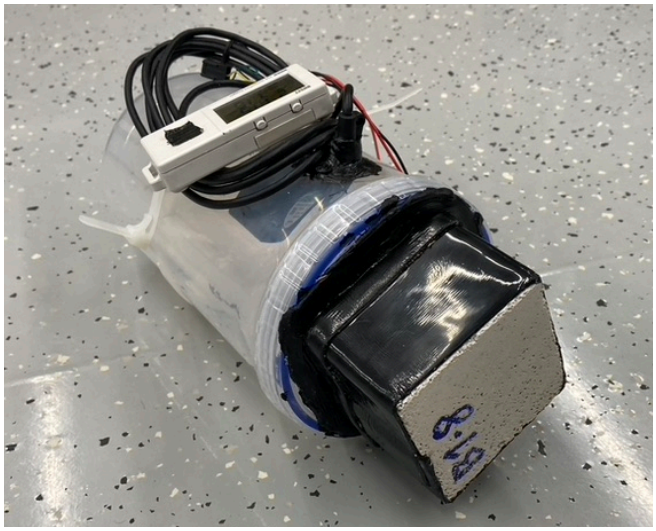
R_d- veeuru gaasikonstant, 462,10^{-6} Nm/(mg.K),

T- katsekeha keskmine temperatuur, □C,

p- õhurõhk, Pa.

2.5.2 Mitteisotermiline topsikatse

Mitteisotermilise topsikatse eesmärk on mõõta veeaurujuhtivust, kui lisaks erinevale suhtelisele niiskusele on katsekeha eri pooltel ka erinev temperatuur. Katsekehad kinnitati kaante külge samamoodi nagu isotermilise katse puhul, aga KCl soolalahus pandi topsis olevasse eraldi vanni. See on tingitud katsemasina ülesehitusest, mis nõuab, et topsid oleks horisontaalses asendis. Topsi pandi ka temperatuuri ja suhtelise niiskuse andur ning protsessi kiirendamiseks ka ventilaator.



Joonis 2.23 Mitteisotermilise topsikatse jaoks ettevalmistatud katsekeha

Madal temperatuur tekitati külmkapiga, mis hoidis ligikaudu 5 °C ning mille ukse sisse olid tehtud vastavad avad katsekehade jaoks. Soolalahusega pool läks külmkappi, mis tekitas sinna suhtelise õhuniiskuse ligikaudu 87 % ning avatud pind jäi ruumiõhku (ligikaudu 23 °C ning 50 % RH). Tingimuste stabiilsuse hoidmiseks ning protsessi kiirendamiseks ehitati ukse kohale tuuletunnel ventilaatoritega.

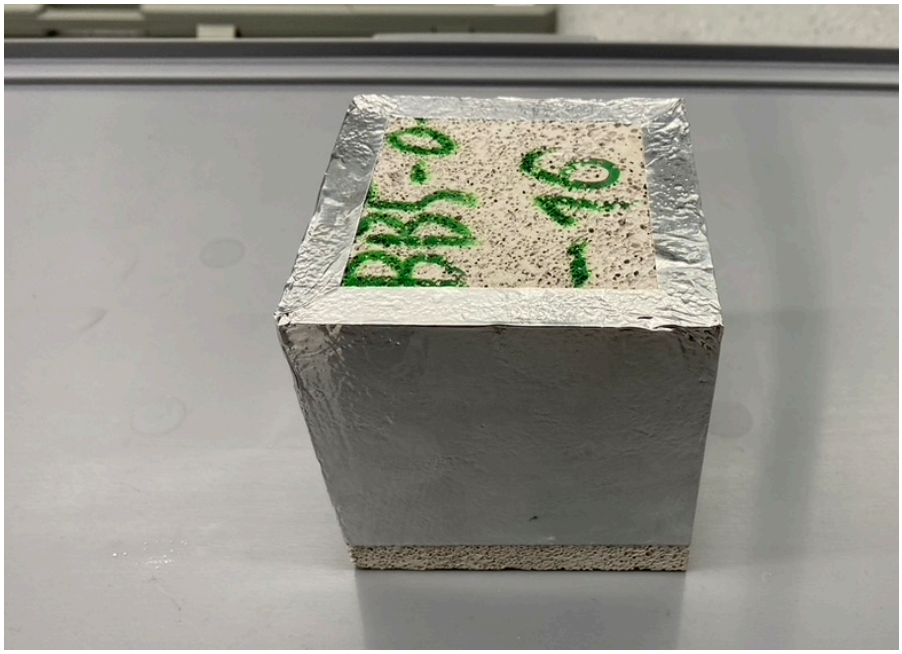


Joonis 2.24 Mitteisotermilise topsikatse seade

Veeauru difusioonitakistustegur arvutati samade valemite alusel, nagu isotermilise katse puhul.

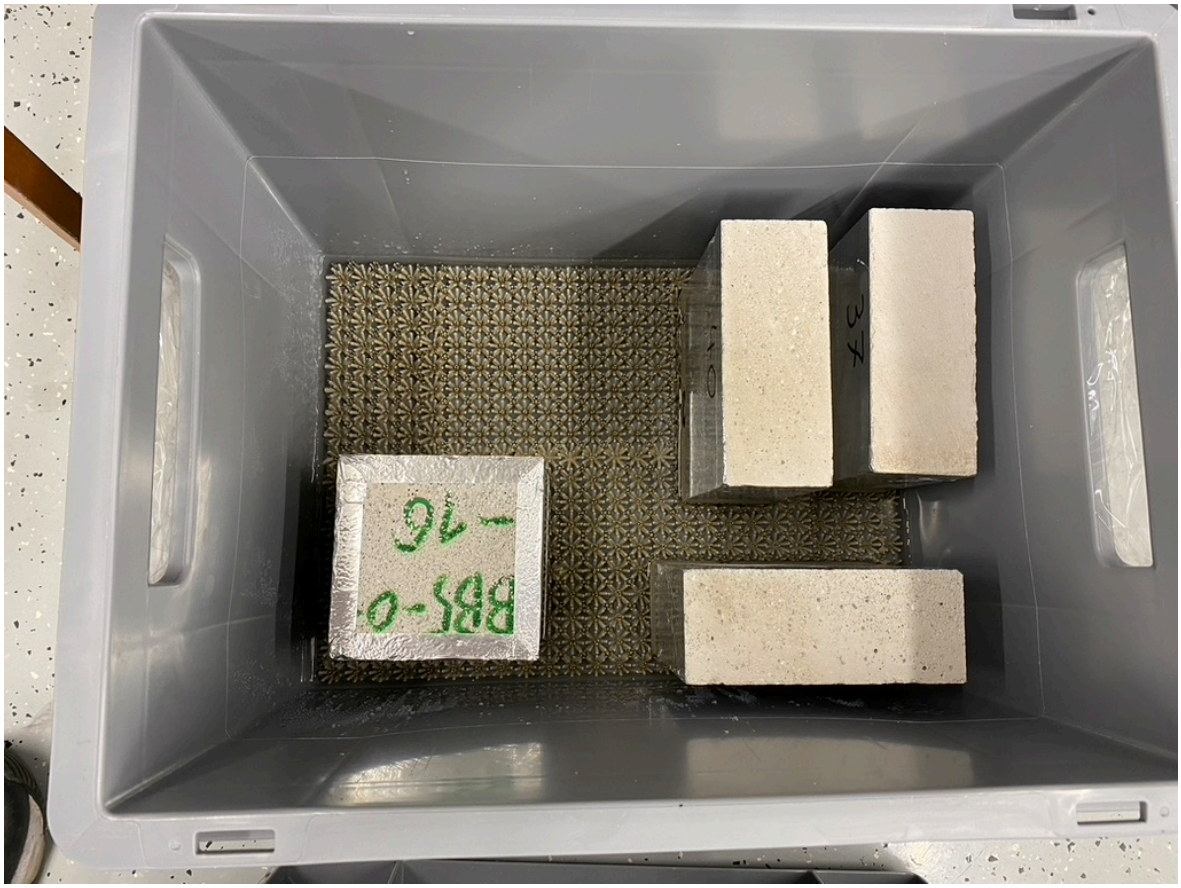
2.6 Veeimavus

Veeimavuse katse eesmärk on mõõta materjali massimuutu ühedimensioonilisest vee imendumisest. Katsekehad mõõtudega 100x100x100 mm ning 130x130x50 mm kuivatati ning küljed kaeti fooliumteibiga, et vältida niiskuslevi keha külgedelt. [26] Seejärel kaaluti ettevalmistatud katsekehad täpsusega 0,001 g.



Joonis 2.25 Ettevalmistatud katsekeha

Katsekeha asetati vanni, kus oli ruumitemperatuuril vesi nii, et alumise külje alla jäid punkttoed, et maksimeerida vee ja materjali kokkupuutepinda. Vann kaeti kaanega, et hoida võimalikult stabiilset keskkonda. Veetase hoiti katse vältel püsivalt 5 □ 2 mm kõrgusel katsekeha põhjast. Järgnevalt tehti kaalumised 5 min, 1 h, 2 h, 4h, 8h möödudes ning edaspidi harvema sagedusega. [26] Standard EVS-EN ISO 15148:2003 näeb ette, et katse lõpetada 24 h möödudes, kuid materjali reaalsete omaduste leidmiseks tuleks katset jätkata kuni pindala kohta massimuudu ning aja ruutjuure graafik saavutab platoo. [10] Kaalumiseks võeti keha veest välja, eemaldati lahtine vesi, kaaluti täpsusega 0,001 g ning asetati katsekeha võimalikult kiirelt vette tagasi.



Joonis 2.26 Katsekehad vees

Massimuut pindala kohta ajahetkel t arvutatakse valemiga: [26]

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \tag{2.13}$$

kus Δm_t– massimuut pindala kohta ajahetkel t, kg/m^2,

m_t – mass ajahetkel t, kg,

m_i – mass katse alguses, kg,

A – vees oleva põhja pindala, m^2.

Materjali veeimavuse koefitsient arvutatakse valemiga: [26]

$$A_w = \frac{\Delta m_t - \Delta m_0}{\sqrt{t}} \tag{2.14}$$

kus A_w - veeimavuse koefitsient, kg/(m$^2 \cdot \sqrt{s}$),

Δm_0– massimuut pindala kohta katse algushetkel, kg/m^2,

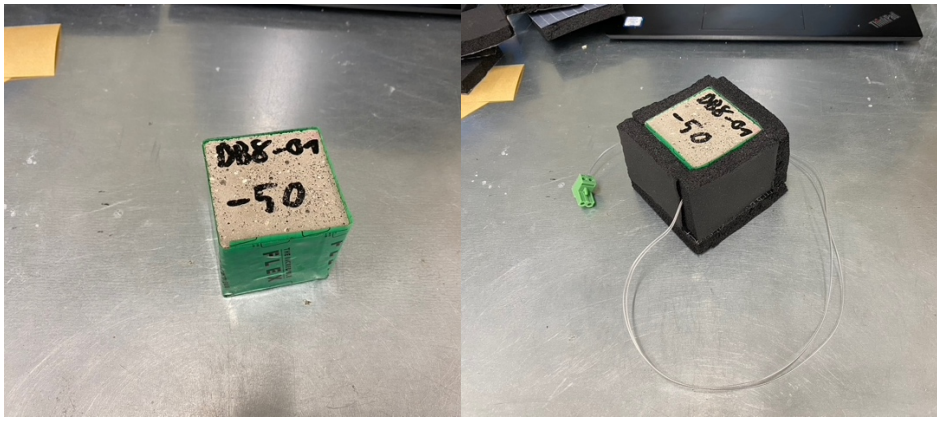
t – katse algusest möödunud aeg, s.

Lihtsamalt öeldes on veeimavuse koefitsiendi puhul tegemist massimuudu ja aja ruutjuure graafiku lineaarse trendijoone tõusuga.

2.7 Kuivamiskatse

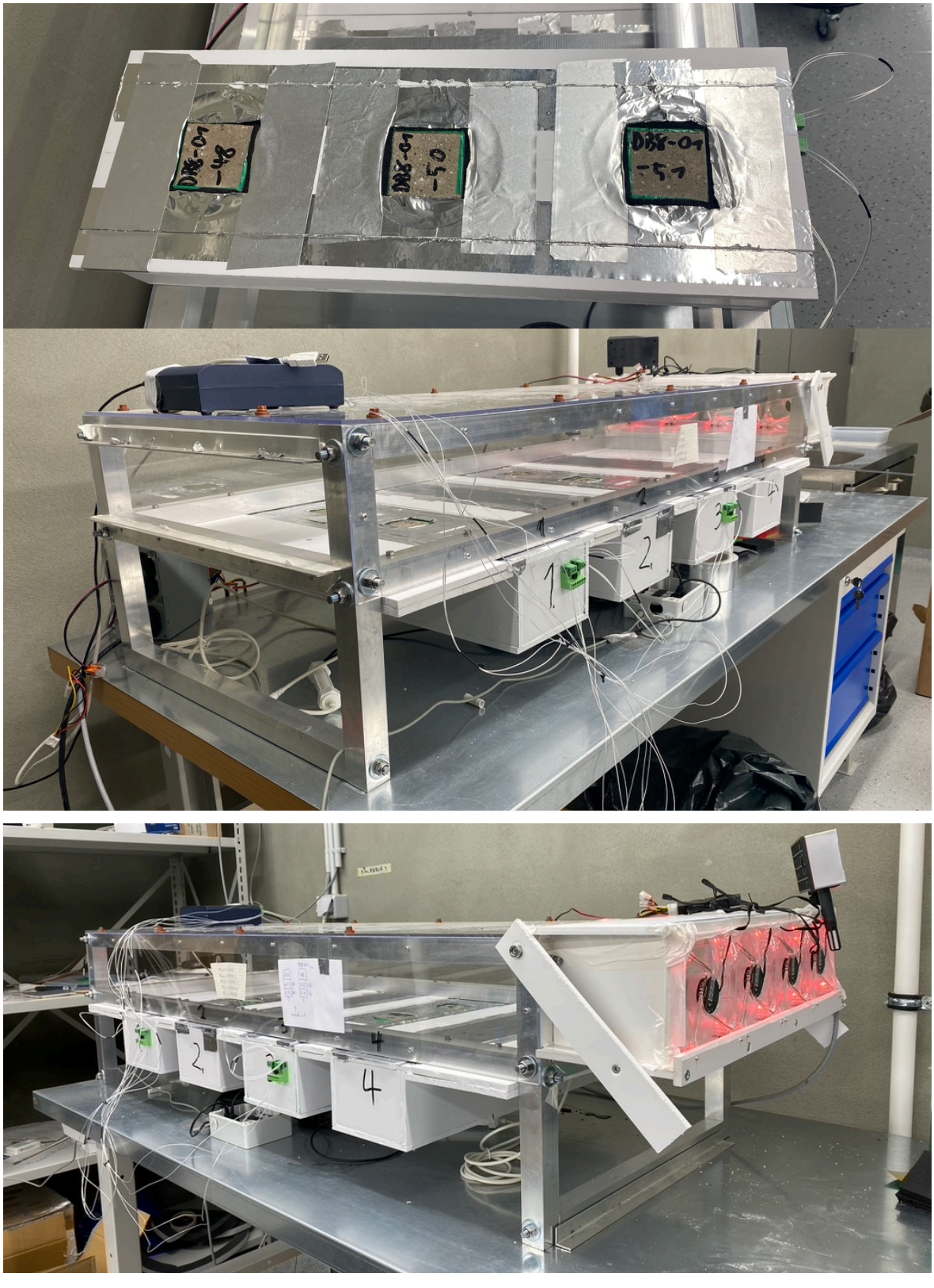
Kuivamiskatse eesmärk on anda infot materjali niiskuslevi omaduste kohta ülehügroskoopse piirkonna madalamas osas. Materjali kuivamine sõltub tugevalt ääretingimustest, mistõttu tõenäoliselt ei ole välja töötatud standardseid meetodeid selle katse läbi viimiseks. [10]

Kõigepealt määrati 50x50x50 mm mõõtudega katsekehade netokuivtihedused, seejärel küllastati veega eksikaatoris ja kaaluti uuesti täpsusega 0,001 g. Seejärel teibiti katsekehad külgedelt ja põhja pealt polüetüleenteibiga, et vältida niiskuslevi nendest tahkudest. Teibi ja katsekeha vahele, umbes 5 kuni 10 mm kaugusele katsekeha ülemisest servast, asetati temperatuuriandur. Külgedele lisati ka 12 mm paks kiht Armaflex teipi, et hoida katsekeha temperatuuri võimalikult ühtlasena. Ettevalmistatud katsekehad kaaluti täpsusega 0,001 g ning alustati võimalikult kiirelt katsega, et vältida materjali kuivamist enne katset.



Joonis 2.27 Ettevalmistatud katsekehad

Katseseade koosneb ventilaatoritega tuuletunnelist ja selle põhjas olevatest materjalisahtlitest. Materjalisahtli põhja pandi EPS soojustus paksusega 30 kuni 50 mm, et katsekeha temperatuur oleks võimalikult ühtlane. Katsekeha asetati sahtlisse nii, et pealmine avatud pind jäi tasapinnaliseks tunneli põhjaga ning katsekeha ja tunneli põhja vahele tekkinud pilud tihendati fooliumteibiga. Temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust jälgiti tunneli eri punktides anduritega.



Joonis 2.28 Katsekehad katseseadmes

Katsekehasid kaaluti regulaarselt täpsusega 0,001 g, et saada teada niiskussisaldus antud ajahetkel vastavalt punktis 2.3.1 toodule.

2.8 Materjaliomaduste modelleerimine

Materjali soojus- ja niiskuslevi dünaamiliseks modelleerimiseks kasutati tarkvara IBK Delphin 6.1. Mudelid ehitati üles ühedimensioonilistena.

Kristo Koppel uuris enda magistritöös kolmekihilise soojustatud poorbetoonpaneeli niiskusliku toimivuse eeldusi ning modelleeris töö käigus paneeli, mille sarnane võib olla selles töös uuritud materjali kasutusväljund. Võrdluse huvides modelleeriti läbi samasugune tarind samade ääretingimustega, kasutades siin töös leitud poorbetooni omadusi. [27]

Arvutusperioodi pikkuseks valiti 5 aastat ning kasutati kahte erinevat väliskliimat, milleks olid Väike-Maarja testpunktis kogutud andmete põhjal loodud kriitilised testaastad: „kondensaadi testaasta 1995-1996" ning „hallituse testaasta 1989-1990", orientatsiooniga 225° edelasse. Vastavalt Kristo Koppeli leitud kriitilistele perioodidele tehti kondensaadi testaasta arvutused algusega 1. jaanuar ning hallituse testaasta arvutused algusega 1. juuli.

Sisekliima tingimused on sõltuvad väliskliimast. Modelleerimiseks valiti standardi EVS-EN 13788:2021 *Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisisese kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid* alusel sisekliima klass C ning niiskusklass 3. See tähendab peale 2000. aastat ehitatud välisõhu temperatuuri abil juhitava keskküttesüsteemiga elamu, mille niiskuskoormus on teadmata ning elupinda on ühe inimese kohta kuni 30 m^2.

Tarindi soojus- ja niiskustehnilise toimivuse modelleerimisel peab arvestama ka poorbetooni algniiskusega, mis võib esimestel kuudel osutuda kriitiliseks faktoriks. Modelleerimiseks valiti algniiskus massiprotsendina 35%, mis võib vastata paneelile, mis on peale tehases valmimist laoruumis seisnud ning saanud veidi kuivada. [27]

2.8.1 Mudelite ülesehitus

Modelleerimine viidi läbi kahe erineva tarindiga. Esiteks modelleeriti läbiva poorbetooniga sein, et jäljendada mõnd ehituslikku sõlme. Teiseks modelleeriti kolmekihiline seinapaneel. Mõlematele mudelitele lisati ka sise- ja välisviimistlus.

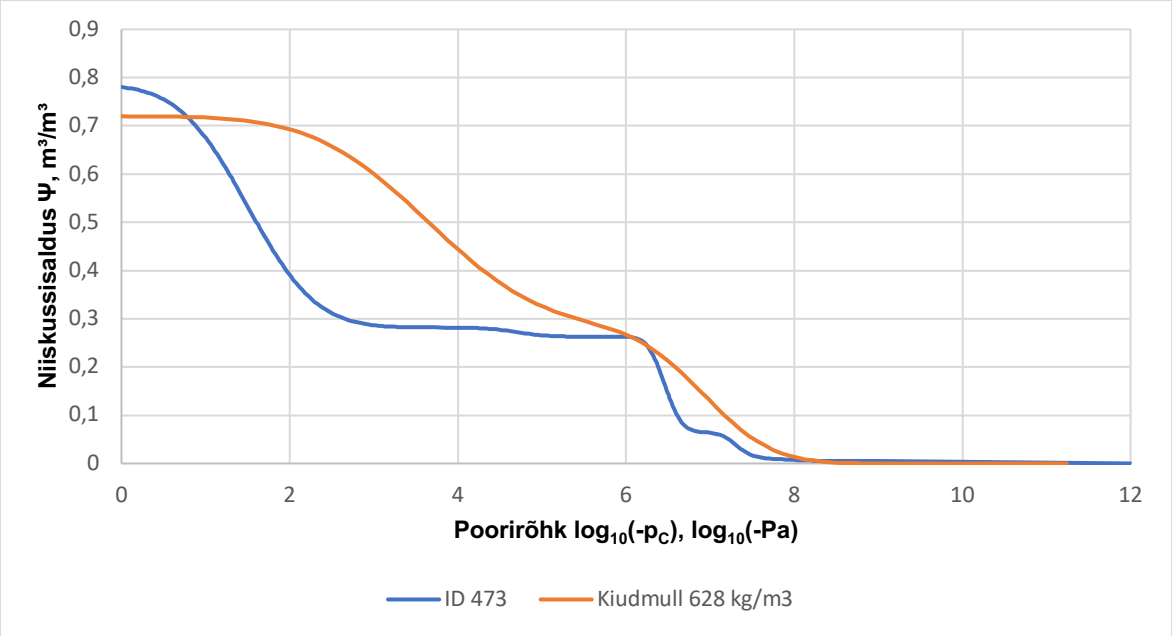
Mõlemad tarindid modelleeriti läbi kahe erineva poorbetooniga: „Kiudmull 628 kg/m^3", mis on antud töö raames leitud andmete põhjal loodud materjal, ning IBK Delphin andmebaasist pärineva poorbetooniga. Järgnevalt on välja toodud andmebaasist pärinevate materjalide omadused. Tasub tähele panna, et mõlema krohvi

difusioonitakistustegurit ning veeimavust on muudetud vastavalt Eestis tüüpiliselt kasutatavate krohvide andmetele. [27]

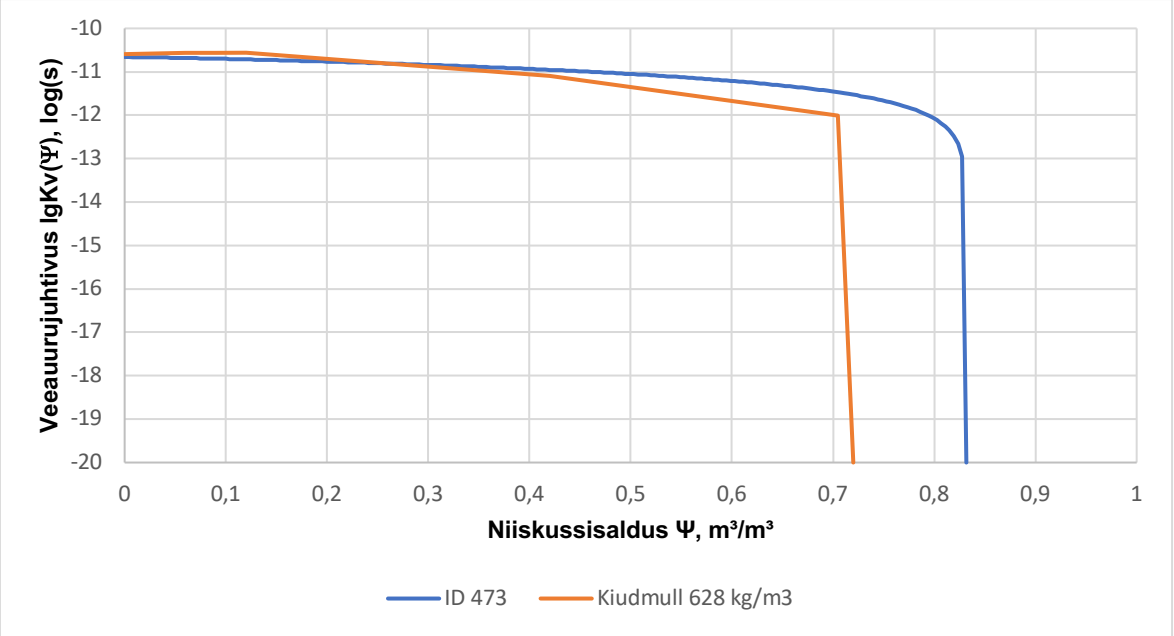
Tabel 2.3 Mudelites kasutatud Delphin andmebaasist pärinevate materjalide omadused

Materjal	Poorbetoon	Uuritud materjal	PU-vaht	väliskrohv	sisekrohv
Delphin ID	473	-	195	145	145
Soojuserijuhtivus, W/(mK)	0,10	0,172	0,029	0,55	0,55
Netokuivtihedus, kg/m³	415	628	45	1270	1270
Avatud poorsus, m³/ m³	0,78	0,72	0,92	0,45	0,45
Difusioonitakistustegur □	8,9	7,95	104	25	25
Veeimavuse koefitsient, kg/(m² · √s)	0,039	0,065	0,0001	0,0258	0,0516

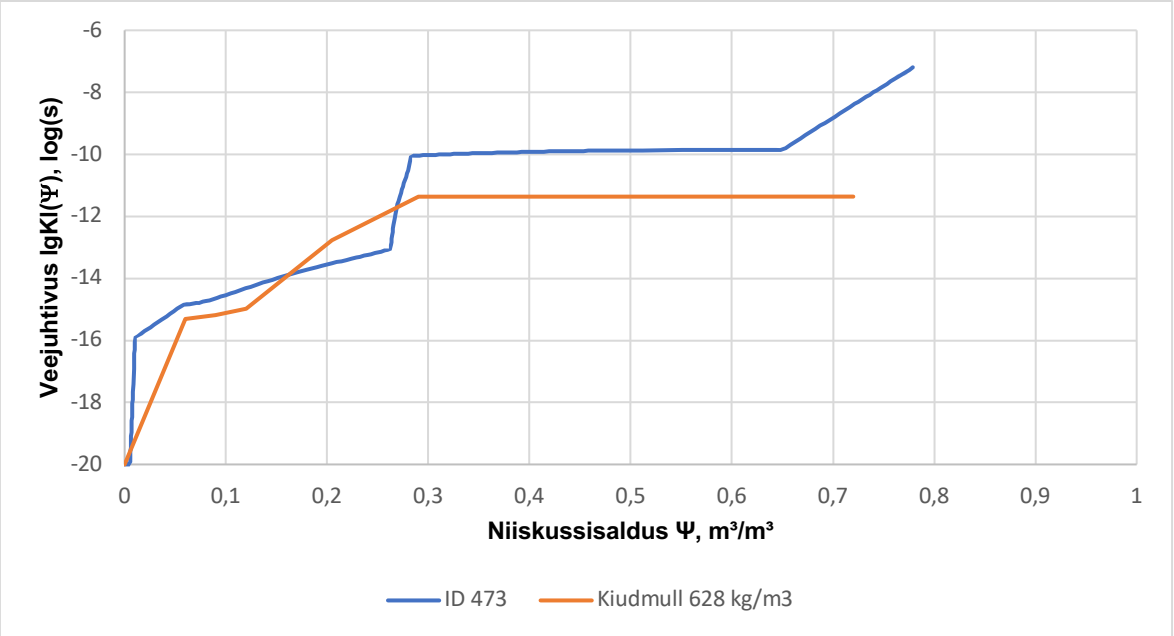
Ülejäänud materjalid, kõik peale poorbetooni, jäi mõlema variandi puhul samaks. Järgnevalt on välja toodud võrdluseks mõlema poorbetooni materjalifaili ülesehitusel kasutatud sorptsioon-, aurujuhtivus- ning vedelikujuhtivuskõverad.



Joonis 2.29 Modelleerimisel kasutatud poorbetoonide sorptsioonkõverad



Joonis 2.30 Modelleerimisel kasutatud poorbetoonide veeaurujuhtivusk6verad



Joonis 2.31 Modelleerimisel kasutatud poorbetoonide vedelikujuhtivusk6verad

Sorptsioonkõverate põhjal on näha, et antud töös uuritava materjali tasakaaluniiskused on kõrgemad kui andmebaasis oleval materjalil. Samuti annavad sorptsioonkõverad infot materjali pooristruktuuri kohta. Andmebaasist pärit materjal sisaldab rohkem suuri poore kui töös uuritud materjal. [10]

Aurujuhtivus on antud materjalide potentsiaalses kasutusvaldkonnas, ehk mahulises niiskussisalduses kuni umbes 0,3 samaväärne ja seal märgatavat vahet ei ole. Vedelikujuhtivuse graafikult saab välja lugeda, et andmebaasist pärit materjal hoiab

üldiselt madalamat niiskussisaldust, kuna tema vedelikujuhtivus on enamasti kõrgem ning seega on ta võimeline niiskust paremini materjalis ümber jaotama.

Tabel 2.4 Kolmekihilise seinapaneeli ülesehitus

Kihi paksus, mm	**Materjal**
Väliskliima	
10	Väliskrohv
80	Poorbetoon
150	Polüuretaanvaht
150	Poorbetoon
3	Sisekrohv
Sisekliima	

Tabel 2.5 Ühekihilise seinapaneeli ülesehitus

Kihi paksus, mm	**Materjal**
Väliskliima	
10	Väliskrohv
380	Poorbetoon
3	Sisekrohv
Sisekliima	

3. KATSETULEMUSED JA JÄRELDUSED

3.1 Netokuivtihedus ja poorsus

Tabel 3.1 Eksperimentide käigus kasutatud nelja tootmispartii netokuivtiheduste statistika, kg/m^3

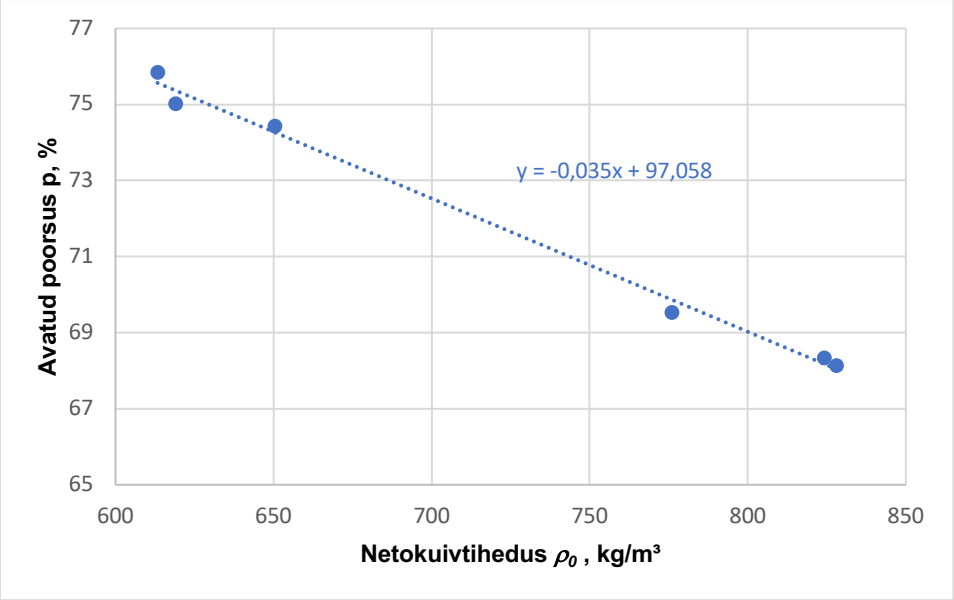
Statistik	AB5-03	AB5-05	BB5-01	DB8-01
Aritmeetiline keskmine	636	599	661	805
Mediaan	631	607	667	812
Standardhälve	27	35	31	38
Miinimum	597	532	576	718
Maksimum	681	647	704	875
Amplituud	84	115	128	156

Pidades silmas, et materjali tootmisel olid soovitud netokuivtihedused vastavalt 500 kg/m^3 ning 800 kg/m^3, saab öelda, et tootmisprotsessi või betoonisegu retsepti peab püstitatud eesmärkide saavutamiseks veel parandama. Antud lõputöö ei keskendu nendele aspektidele ja nende täpsemaks analüüsimiseks puudub ka ligipääs vajalikule informatsioonile.

Kuna tegu on eksperimentaalselt toodetud materjaliga, on ootuspäraselt tiheduste hajuvus üpris kõrge. Kaia Koitmäe mõõtis oma lõputöö raames Eestis kasutatavaid poorbetoonist müürikive ning tema leidis, et tootja poolt 400 kg/m^3 tihedusega deklareeritud materjali maksimum ja miinimum tiheduse amplituud oli kõigest 16 kg/m^3. [28] Materjali kuivtihedus on tugevalt seotud tema niiskuslike omadustega, seega saab eeldada, et ka katsete raames saadud tulemused on teatava hajuvusega.

Tabel 3.2 Kuivamiskatsele eelnenud mõõtmiste põhjal arvutatud avatud poorsused

Katsekeha	Netokuivtihedus, kg/m^3	Avatud poorsus, %
AB5-03 A3-2	619	75
AB5-05 B3-2	613	76
BB5-01 C7-2	650	74
DB8-01-48	776	70
DB8-01-50	828	68
DB8-01-51	824	68



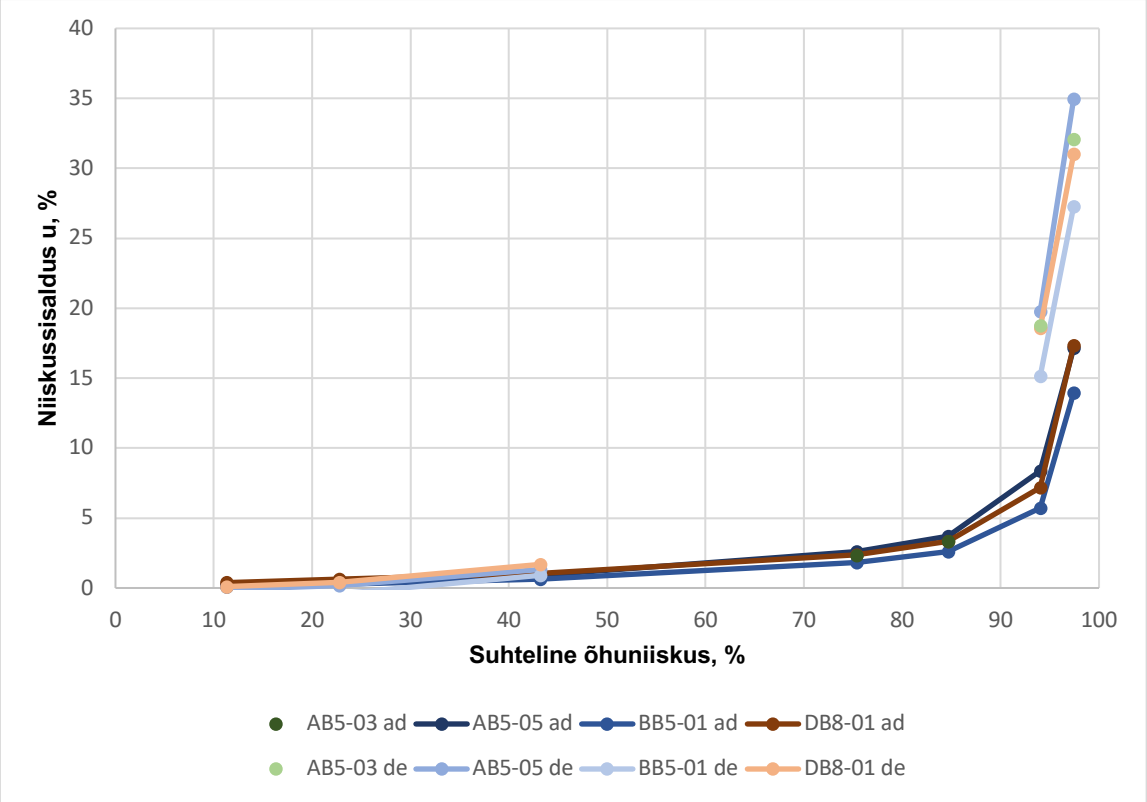
Joonis 3.1 Avatud poorsuse ja netokuivtiheduse suhe

Materjali poorsust mõõdeti kuivamiskatse jaoks vaakumeksikaatoris küllastatud kehade põhjal. Poorsuse väärtused olid ootuspärased, arvestades katsekehade netokuivtihedust ning kirjanduses toodud väärtusi.

3.2 Tasakaaluniiskus

Tabel 3.3 Tasakaaluniiskuse katses kasutatud kehade keskmised netokuivtihedused

Katsekeha	Kasutatud katsekehade keskmine netokuivtihedus, kg/m³
AB5-03	629
AB5-05	594
BB5-01	643
DB8-01	756



Joonis 3.2 Adsorptsioon- ja desorptsioonkõverad hügroskoopses niiskuspiirkonnas

Märgatavad erinevused niiskussisaldustes hakkavad tekkima kõrgete suhteliste niiskuste juures, üle 90 %. Seega keskendun analüüsis põhiliselt olukordadele, kus suhteline niiskus on kõrge, ehk lähedal kriitilisele piirile. Tavapärase eluruumi sisekliima tingimustes on materjali käitumine etteaimatav ja ei mõjuta oluliselt tarindi soojus- ja niiskustehnilist toimivust. Tarindi projekteerimisel on kriitiline mõista materjali käitumist kõrge niiskussisalduse juures, kus hakkavad toimuma protsessid, mis otseselt mõjutavad selle toimivust.

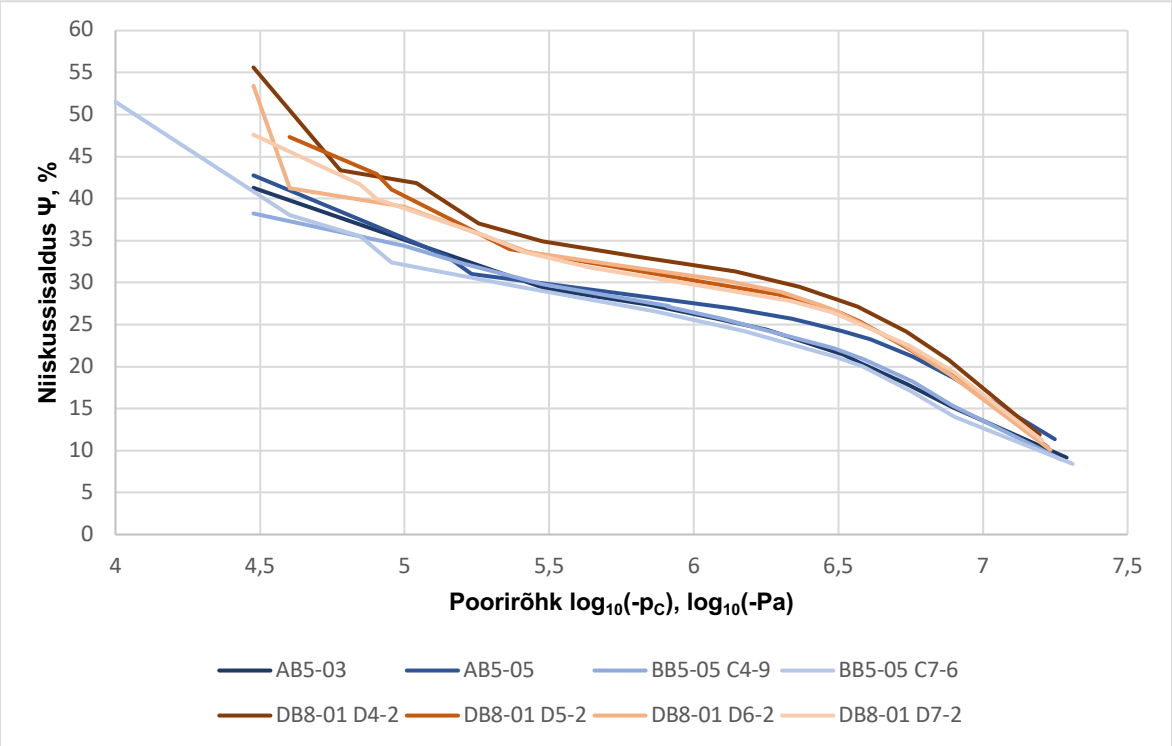
Ootuspäraselt on niiskussisaldused desorptsioonil märgatavalt kõrgemad kui adsorptsioonil, kuid selget sõltuvust tiheduse ja tasakaaluniiskuse vahel hügroskoopses niiskuspiirkonnas välja ei joonistu. Hügroskoopses piirkonnas mõjutab tasakaaluniiskust materjali pooristruktuur. Nagu mainitud peatükis 1, toimub niiskuse imendumine peamiselt väikestes poorides ning antud materjali tootmisprotsesside kontrollitus ei ole veel nii hea, et tagada ühtlast poorisuuruste jaotust kogu materjalis. Hügroskoopses piirkonnas niiskuse imendumine toimub nii väikestes poorides, et materjali purustamine pulbrilisele kujule ei mõjuta saadud tulemusi. Samal ajal kiirendab see oluliselt katse käiku. [29]

Tabel 3.4 Kastepunktipsühromeetri katses kasutatud katsekehade netokuivtihedused

Katsekeha	Netokuivtihedus, kg/m³
AB5-03	597
AB5-05	619
BB5-01 C7-6	698
BB5-01 C4-9	644
DB8-01 D4-2	779
DB8-01 D5-2	803
DB8-01 D6-2	765
DB8-01 D7-2	774

Tabel 3.5 Poorirõhu ja suhtelise õhuniiskuse suhe

Poorirõhk log10(-pC), log10(-Pa)	Suhteline õhuniiskus, %
4	99,99267
4,5	99,97681
5	99,92670
5,5	99,76837
6	99,26937
6,5	97,70774
7	92,92927
7,5	79,30298

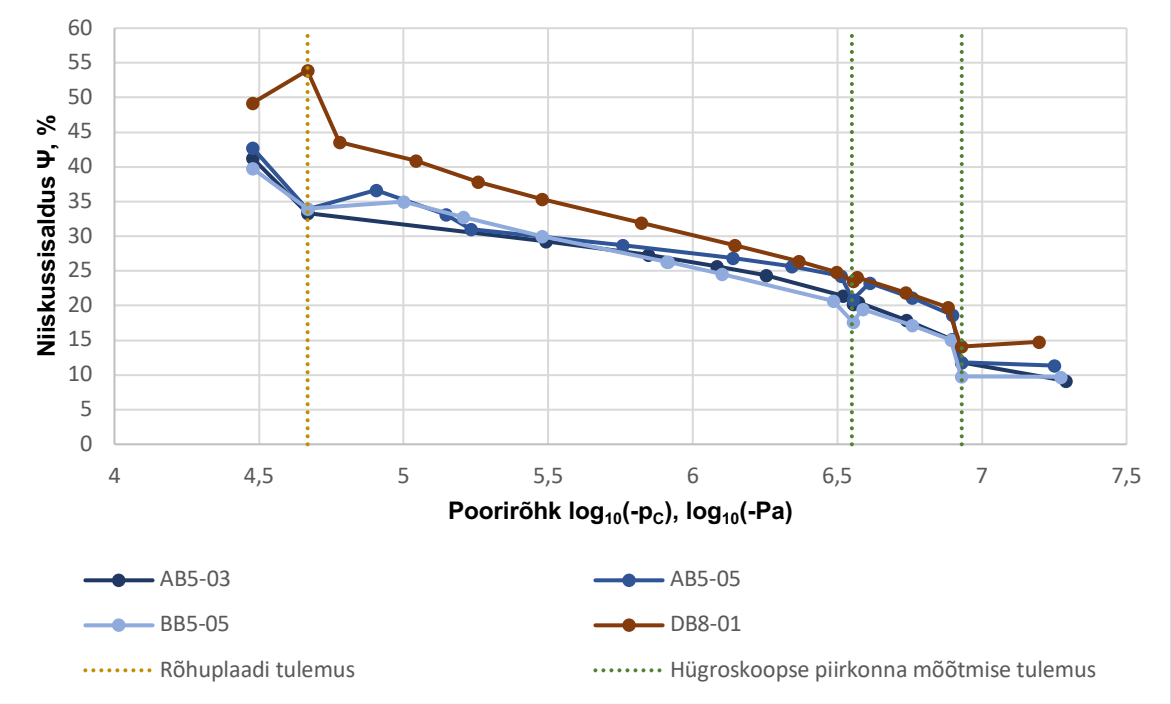


Joonis 3.3 Desorptsioonkõverad ülehügroskoopses niiskuspiirkonnas

Joonisel 3.3 on toodud kastepunktipsühromeetriga mõõdetud tasakaaluniiskused ülehügroskoopses niiskuspiirkonnas. Osas, kus see kattub hügroskoopse piirkonnaga, ei ole tulemuste varieeruvus märgatav. Nagu jooniselt näha, siis suurem hajuvus tasakaaluniiskustes hakkab tekkima kõrgema suhtelise niiskuse juures, kus hakkab suuremat rolli mängima makropooride mõju. Antud meetod võimaldab mõõta tasakaaluniiskusi ülehügroskoopse niiskuspiirkonna madalamas osas ning ei anna täit infot kogu piirkonna kohta.

Mõõdetud vahemikus on märgata, et materjali netokuivtihedus, mis on otseselt seotud pooristruktuuriga, mõjutab tema tasakaaluniiskust. Vahemikus ligikaudu 97,7 % kuni 99,8 % suhtelise õhuniiskuse juures on 800 kg/m^3 sihttihedusega materjali mahuline niiskussisaldus umbes 5 protsendipunkti kõrgem kui 500 kg/m^3 sihttihedusega materjalil. Puudub küll info kogu ülehügroskoopse niiskuspiirkonna kohta, kuid tulemuste põhjal võib arvata, et see vahe suureneb veelgi, kui suhteline õhuniiskus suureneb.

Desorptsioonkõveral niiskussisalduste kaks järsemat langust, 4,5 ning 6,5 $\log_{10}$(-Pa) juures, vastavad olukordadele, kus sarnase suurusega poorid tühjenevad korraga veest. [6]



Joonis 3.4 Desorptsioonkõverad koos tulemustega kõigist meetoditest

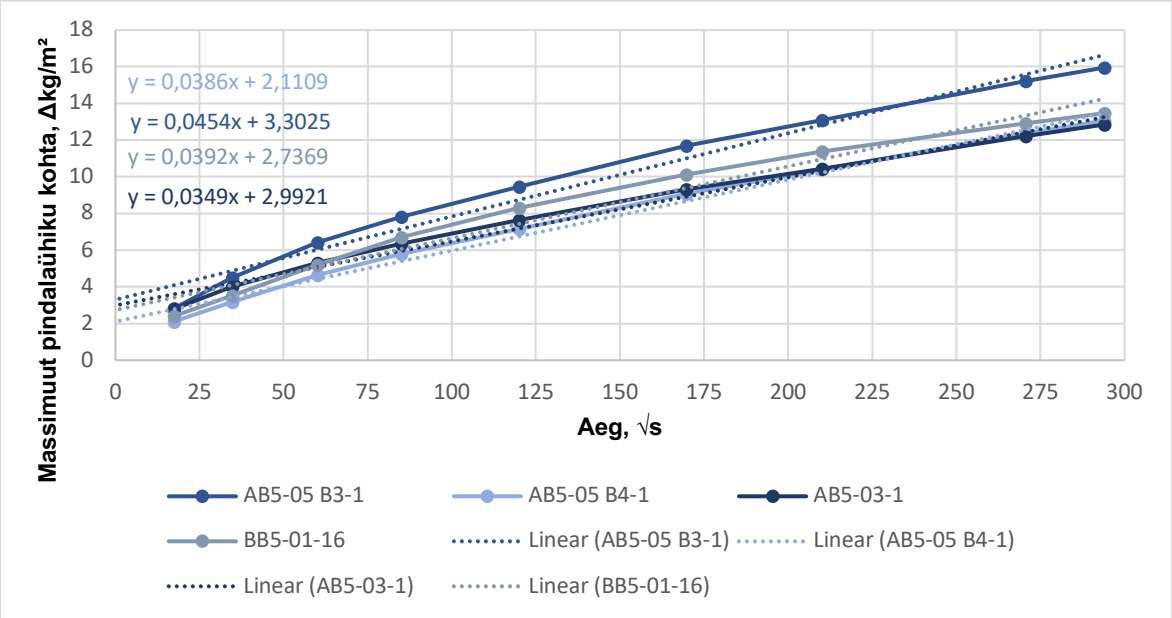
Tehnilistest tõrgetest tulenevalt õnnestus mõõta rõhuplaadimasinal vaid üks punkt. Nagu eelnevalt mainitud, andis kastepunktipsühromeeter infot ülehügroskoopse niiskuspiirkonna madalama osa kohta ning rõhuplaadimasinal saab infot kõrgema osa

kohta. Samuti kattuvad osaliselt ka hügroskoopne ja ülehügroskoopne niiskuspiirkond. Analüüsides kõiki kolme meetodit koos, selgub, et ühest niiskussisalduskõverat nendest tuletada ei õnnestu. Antud nähtus oli samas ootuspärane, sest igal meetodil on teatud süstemaatilised ja juhuslikud hälbed. Samuti sooritati eksperimendid erinevate katsekehadega ning arvestades netokuivtiheduste ning muude omaduste suurt hajuvust, võis ka see osaliselt põhjustada antud nähtust. [30]

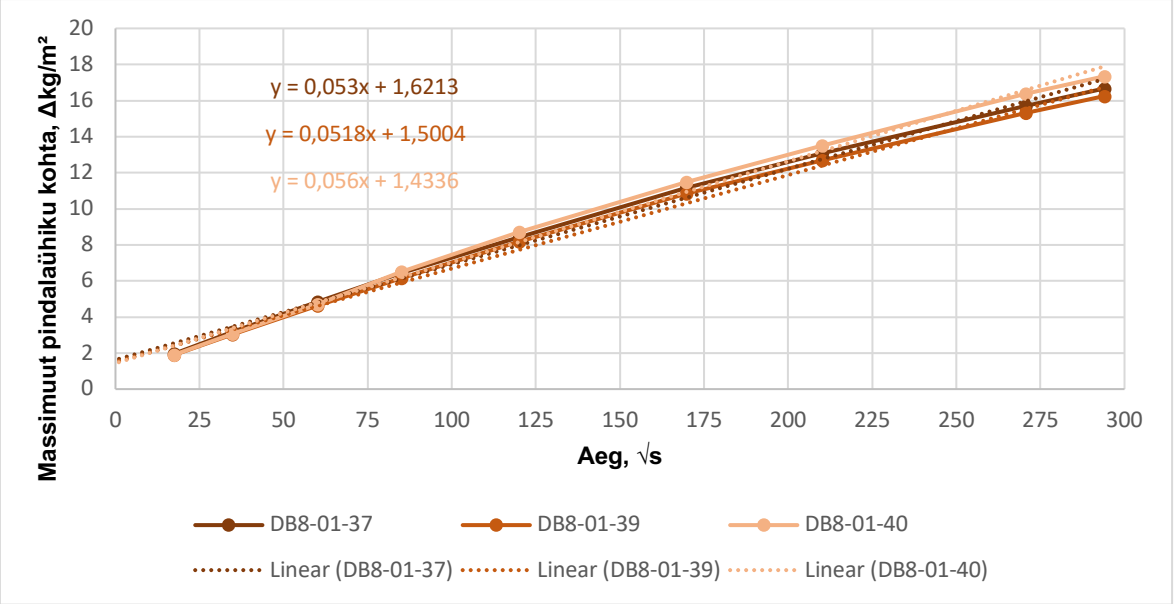
3.3 Kapillaarne veeimavus

Tabel 3.6 Kapilaarse veeimavuse katses kasutatud katsekehade netokuivtihedused

Katsekeha	Netokuivtihedus, kg/m³
AB5-03-1	642
AB5-05 B3-1	644
AB5-05 B4-1	632
BB5-01-16	631
DB8-01-37	875
DB8-01-39	835
DB8-01-40	842



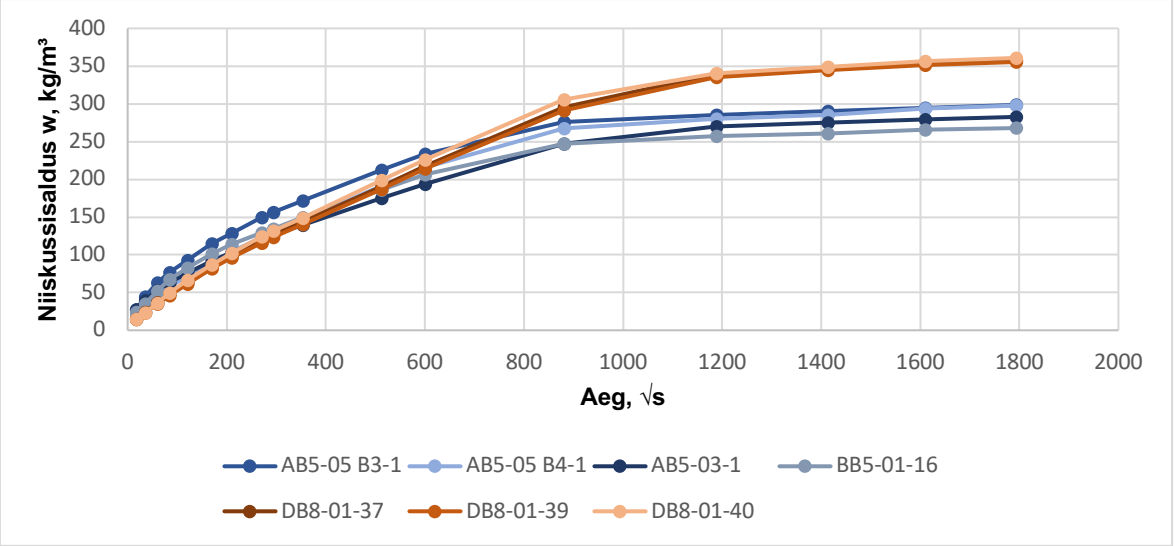
Joonis 3.5 "500 kg/m³" katsekehade massikasv katse jooksul



Joonis 3.6 "800 kg/m^3" katsekehade massikasv katse jooksul

Tulemustest on näha, et 500 kg/m^3 sihttihedusega materjali kapillaarse veeimavuse koefitsiendi hajuvus on suurem kui 800 kg/m^3 sihttihedusega materjali puhul. Kuna veeimavuse puhul mängib olulist rolli pooristruktuur, siis see on seletatav materjali pooristruktuuri ühtlusega, kuna suurema tihedusega materjal on pärit ühest tootepartiist, kui teist materjali toodeti kolm erinevat partiid.

500 kg/m^3 materjali keskmine kapillaarse veeimavuse koefitsient oli 0,0395 kg/(m^2 · $\sqrt{s}$) ning 800 kg/m^3 materjali keskmine kapillaarse veeimavuse koefitsient oli 0,0536 kg/(m^2 · $\sqrt{s}$). Ootuspärane oli, et suurema tihedusega materjali veeimavuse koefitsient on kõrgem kui väiksema tihedusega materjalil. Tuginedes varasematele uuringutele, oli oodata antud materjali netokuivtiheduste juures veidi kõrgemat veeimavuse koefitsienti, kui antud eksperimendi tulemused näitavad. [31], [32] Tõenäoliselt on põhjuseks basaltkiudude mõju, kuna sarnast tendentsi on ka varem täheldatud, kuigi teoorias peaks kiudude ristumisel tekkima vee transpordiks sobivad vaba ruumiga „poorid". [33]



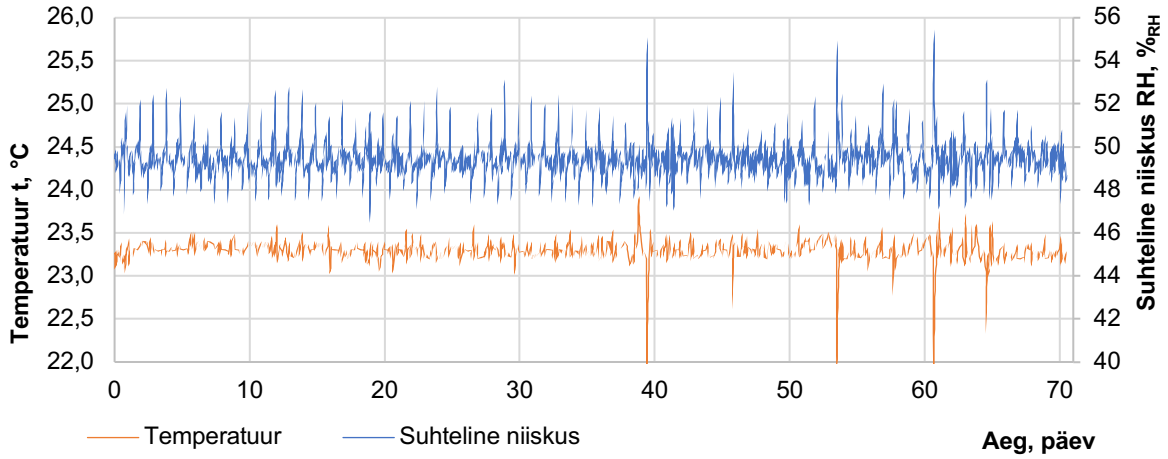
Joonis 3.7 Katsekehade niiskussisaldus kogu katse vältel

Standardi järgi peab veeimavuse katset läbi viima 24 h. Reaalsete materjaliomaduste teada saamiseks jätkati katset kuni kapillaarküllastuse saavutamiseni. Kapillaarküllastuse saavutades ei ima materjal enam kapillaarjõudude mõjul vett ning täitmata on vaid makropoorid. [34] 500 kg/m^3 sihttihedusega materjali puhul saavutati kapillaarküllastus umbes 290 kg/m^3 niiskussisalduse juures ning 800 kg/m^3 materjali puhul oli vastavaks niiskussisalduseks ligikaudu 360 kg/m^3.

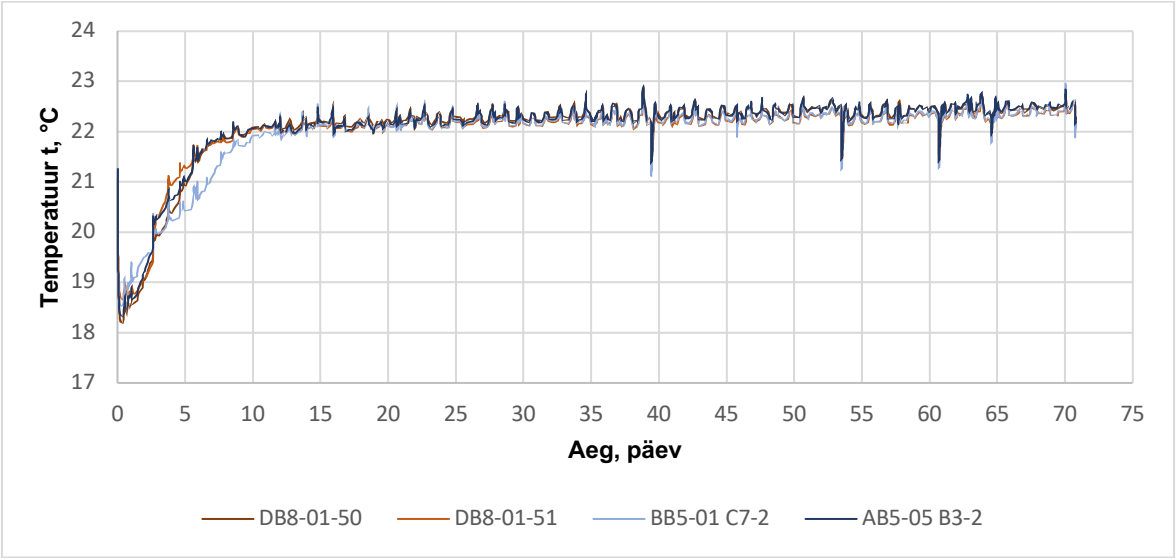
3.4 Kuivamine

Tabel 3.7 Kuivamiskatses kasutatud katsekehade netokuivtihedused

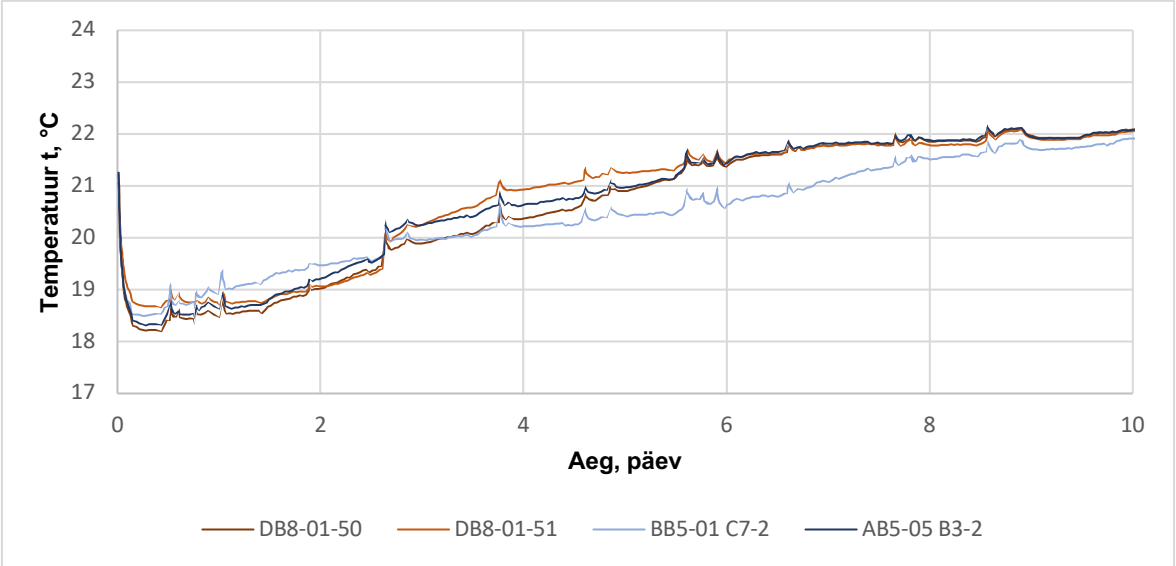
Katsekeha	Netokuivtihedus, kg/m³
AB5-03 A3-2	619
AB5-05 B3-2	613
BB5-01 C7-2	650
DB8-01-48	776
DB8-01-50	828
DB8-01-51	824



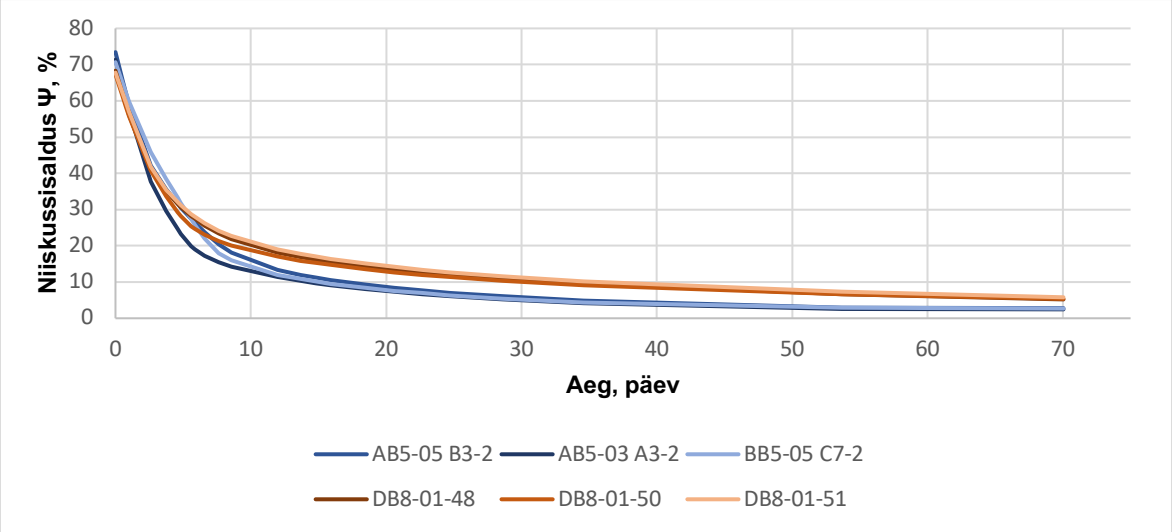
Joonis 3.8 Kuivamiskatse ruumikliima katse jooksul [35]



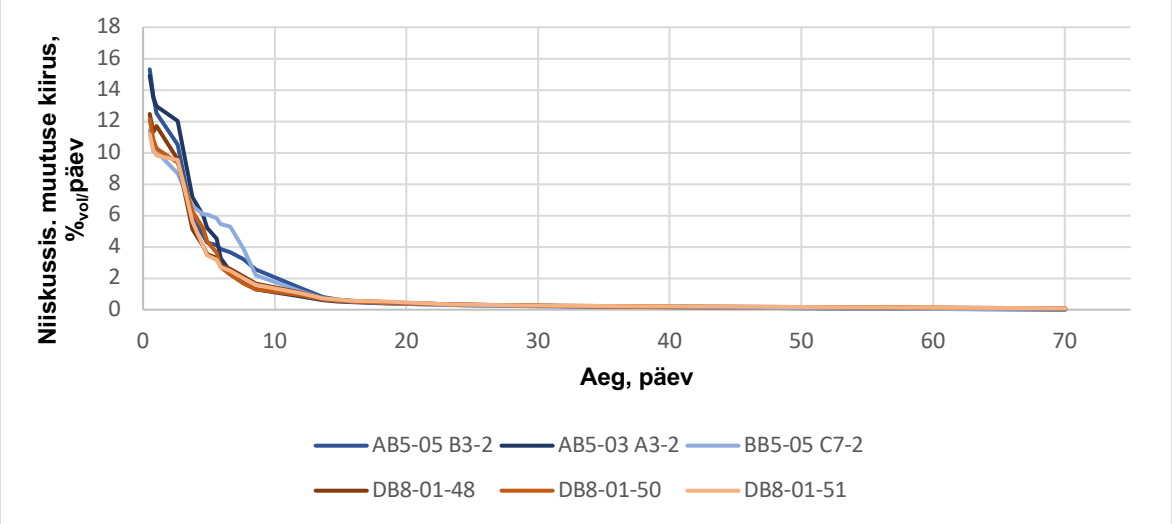
Joonis 3.9 Katsekehade temperatuur pinna lähedal



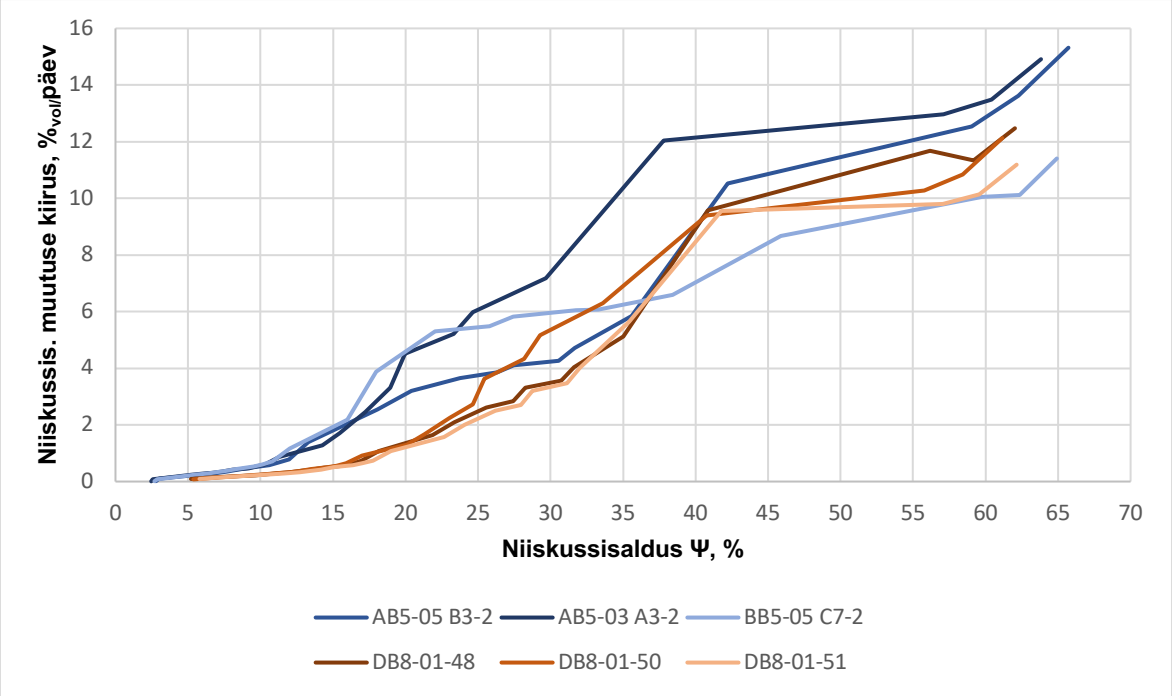
Joonis 3.10 Katsekehade temperatuur esimese kümne päeva jooksul



Joonis 3.11 Katsekehade niiskussisaldus katse vältel

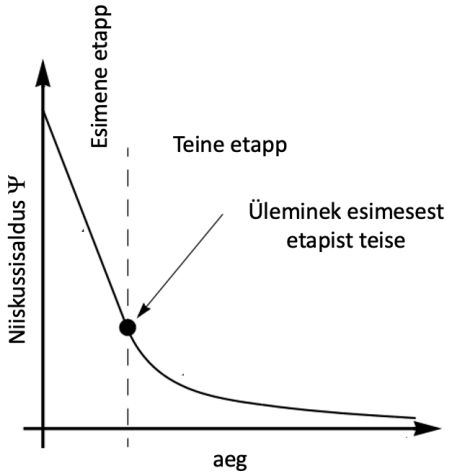


Joonis 3.12 Kuivamise kiiruse muutus ajas



Joonis 3.13 Kuivamise kiiruse sõltuvus katsekeha niiskussisaldusest

Poorse materjali kuivamise saab jagada kahte etappi ning katse käigus saadud tulemuste põhjal saab neid etappe eristada ja mõista selgemini materjali niiskuslikku käitumist kuivamisel. Esimeses etapis mõjutavad kuivamist enim ääretingimused ning teises etapis on suurem mõju materjali omadustel.



Joonis 3.14 Kuivamise kahe etapi eristamine [10]

Esimeses etapis, mis kestis antud katse puhul 3 kuni 5 päeva, toimub vee intensiivne aurustumine katsekeha pinnalt. Materjali sees toimub vedela vee transport pinna peale, kus see aurustub ümbritsevasse keskkonda. Antud aurustumine katsekeha pinnal toob kaasa pinnatemperatuuri languse. Niiskussisalduse langus ajas on lineaarne ja toimub

kiiresti. Kuivamise esimene, intensiivne etapp kestab antud ääretingimuste korral ligikaudu kuni mahulise niiskussisalduseni 40 %. [10]

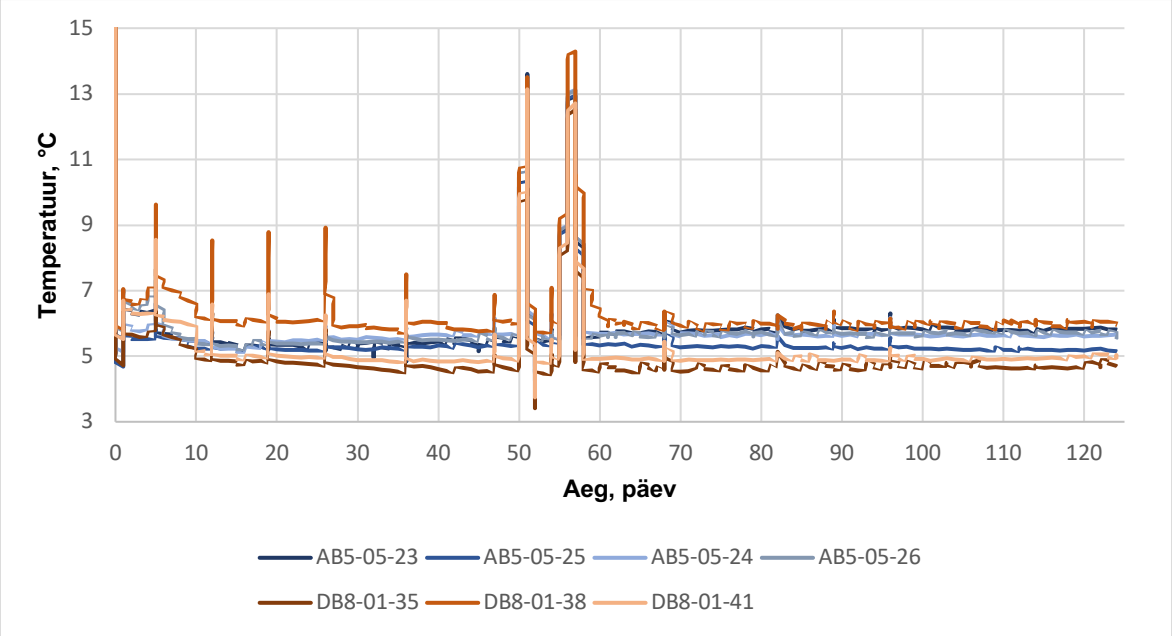
Üleminek teise etappi ei ole reaalsuses selgelt määratletava piirjoonega, kuid algas peale umbes viiendat päeva. Teine etapp algab, kui lõppeb vedela vee transport materjali pinnale ning vesi hakkab aurustuma katsekeha sees. Tekkinud veeaur liigub nüüd katsekeha pinnale gaasilisel kujul. Kuivamine on teises etapis märgatavalt aeglasem, kuna materjali veejuhtivus on kõrgem kui veeaurujuhtivus. Kuna aurustumine ei toimu enam intensiivselt katsekeha pinnalt, saab ka pinnatemperatuur tasakaalustuda ümbritseva keskkonnaga. [10]

Katsetulemustest on näha, et madalama tihedusega katsekehad kuivavad kiiremini kui kõrgema tihedusega materjal. See on seletatav asjaoluga, et mida kõrgem on materjali tihedus, seda madalam on tema vee- ning veeaurujuhtivus. Seega esimeses etapis saab vedel vesi liikuda kiiremini katsekeha pinnale, kust see omakorda ümbritsevasse keskkonda aurustub. Teises etapis saab katsekeha sees aurustunud vesi liikuda difusiooni teel kiiremini pinnale.

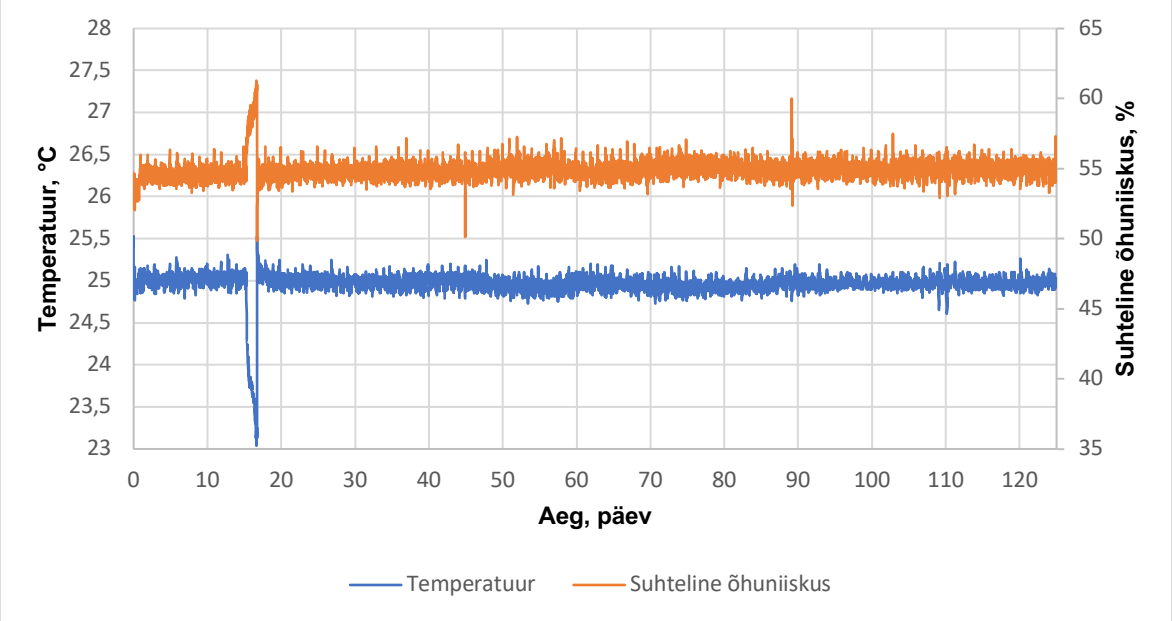
3.5 Kapillaarne kondensaadi ümberjaotumine

Tabel 3.8 Kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katses kasutatud katsekehade netokuivtihedused

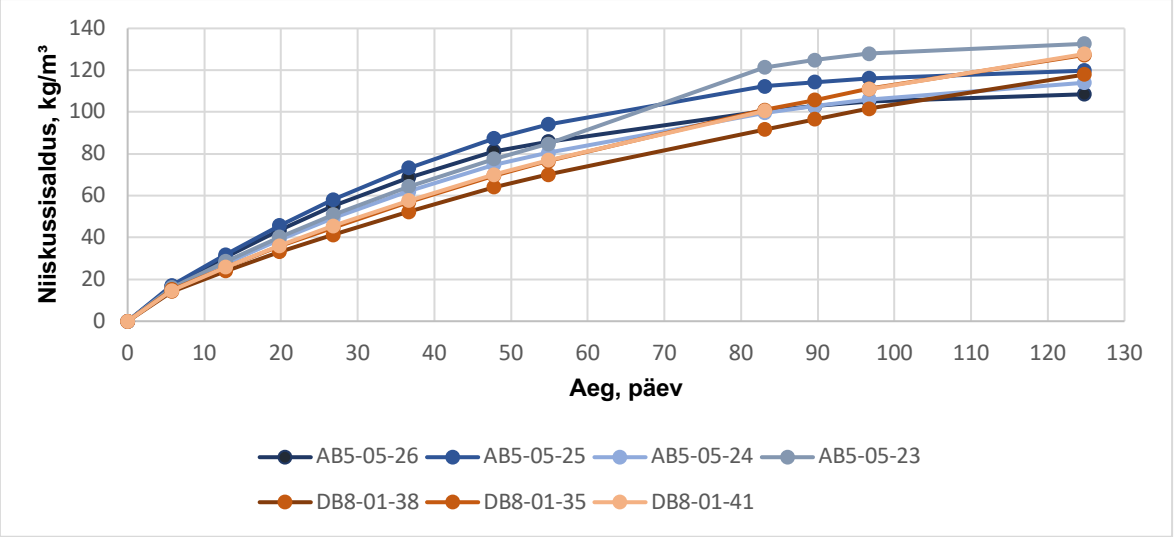
Katsekeha	**Netokuivtihedus, kg/m³**
AB5-05-23	647
AB5-05-24	619
AB5-05-25	561
AB5-05-26	540
DB8-01-35	828
DB8-01-38	778
DB8-01-41	836



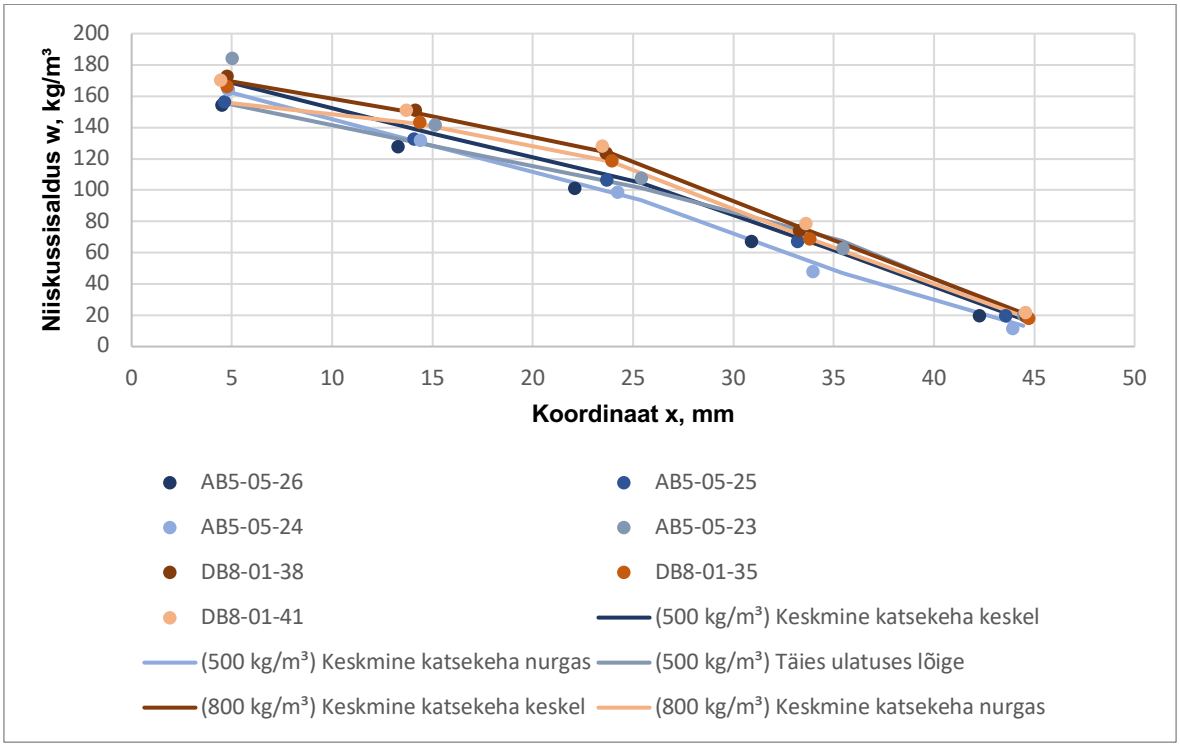
Joonis 3.15 Kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katsekehade temperatuurid alumises pinnas



Joonis 3.16 Kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse ruumikliima



Joonis 3.17 Katsekehade niiskussisaldused katse vältel



Joonis 3.18 Niiskussisalduse jaotus katsekehades

Üldiselt näitavad katsetulemused suurema tihedusega katsekehade kõrgemat niiskussisaldust katse lõpus, mis läheb kokku tasakaaluniiskuse katse tulemustega. Samas ei ole seos niivõrd märgatav ning tabeli 3.9 andmetel ei ole selget seost netokuivtiheduse ja kogu katsekeha niiskussisalduse vahel.

Katsekehade alumises, ehk külmas, ning ülemises, ehk soojas ja niiskes, pinnas on katsekehade niiskussisaldused koondunud või jaotunud tihedust arvestades suhteliselt juhuslikult. Katsekehade alumises pinnas olid niiskussisalduses 155 kuni 185 kg/m^3 ning ülemises pinnas 11 kuni 23 kg/m^3. Kuid niiskussisalduse jaotus kogu materjali lõikes

näitab, et esimese 25 mm, ehk poole materjali ulatuses on materjali niiskussisalduse langus seda suurem, mida väiksem on tema tihedus. Vahe erinevate sihttihedustega materjalide vahel on märgatav, kui 800 kg/m^3 sihttihedusega materjali niiskussisaldus on 500 kg/m^3 sihttihedusega materjali omast kohati kuni 30 kg/m^3 kõrgem.

Alates materjali keskpunktist on kondensaadi ümberjaotumine intensiivsem, mis tähendab, et niiskussisalduse langus kõrgusühiku kohta on suurem. Kuid selles vahemikus on erinevate tihedustega materjalide niiskusprofiilid sarnasemad ning märgatavat vahet suurema ja väiksema tihedusega materjalide vahel pole.

Sarnane jaotus, kus kondensaadi ümberjaotumine on intensiivsem katsekeha soojemas pooles, on välja tulnud varasemates uuringutes kaltsiumsilikaadi kohta. Kuid võrreldes nende tulemustega, on antud töö raames saadud niiskussisalduse jaotus ühtlasem. Samas on tegu ka erineva materjaliga. Kõigi katsekehade puhul oli niiskussisaldus keskel kõrgem kui nurgatükkides. Selle põhjuseks võib olla temperatuuri ebaühtlane jaotus katsekehas või teatav niiskuslevi katsekeha külgede ja väliskeskkonna vahel. Varasemalt on täheldatud vastupidist tendentsi. [36][37]

Tabel 3.9 Kogu katsekeha ja viilude niiskussisalduste võrdlus

Katsekeha	Tihedus, kg/m³	Niiskussisaldus w katse lõpus, kg/m³	Viilude keskmine niiskussisaldus w keskel, kg/m³	Viilude keskmine niiskussisaldus w nurgas, kg/m³
AB5-05-23	647	133	104	89
AB5-05-24	619	114	91	81
AB5-05-25	561	120	97	96
AB5-05-26	540	109	94	-
DB8-01-35	828	127	103	102
DB8-01-38	778	118	109	95
DB8-01-41	836	128	110	106

Tabel 3.9 näitab katsekehade tervikliku niiskussisalduse ja viilude keskmiste niiskussisalduste võrdlust. Antud märgatav niiskuse kadu on tõenäoliselt tingitud lõikamisel tekkinus soojusest ning avatud materjalipinna kasvust, mis mõlemad kiirendavad teataval määral materjali kuivamist. Olgugi, et katse käigus püüti lõikamine ja kaalumine teha võimalikult kiiresti, on niiskuse kadu märgatav ning edaspidistes uuringutes tuleks meetodit täiustada. Seega võib eeldada, et tegelikud niiskussisaldused materjali eri osades on kõrgemad ning võimalik on ka, et niiskussisalduse jaotus reaalsuses veidi erineb antud tulemustest.

3.6 Veeaurujuhtivus

Tabel 3.10 Kuiva topsi katsega saadud difusioonitakistustegurid

Katsekeha	Netokuivtihedus, kg/m³	Difusioonitakistustegur □
AB5-03	620	8,6
AB5-05 B1-8	549	6,9
AB5-05 B1-9	625	8,4
BB5-05	674	7,8
DB8-01-42	780	11,1
DB8-01-44	867	11,0
DB8-01-45	821	9,5
DB8-01-47	843	10,6

Tabel 3.11 Märja topsi katsega saadud difusioonitakistustegurid

Katsekeha	Netokuivtihedus, kg/m³	Difusioonitakistustegur □
AB5-03	620	2,5
BB5-05	674	2,5
DB8-01-45	821	2,7
DB8-01-47	843	2,5

Isotermilistes tingimustes olid materjalide veeaurujuhtivuse näitajad ootuspärased. Nagu mainitud teoreetilises osas, on materjali veeauru difusioonitakistustegur seda kõrgem, mida kõrgem on tema tihedus. Samuti on poorse materjali veeaurujuhtivus seda kõrgem, ehk difusioonitakistustegur madalam, mida kõrgem on materjali niiskussisaldus. Mida kõrgem on materjali niiskussisaldus, seda rohkem hakkab mõju avaldama veejuhtivus ning summaarne vedelikuvoog suureneb, seega difusioonitakistustegur väheneb. Saadud väärtused ühtivad varasemates uuringutes saadud tulemustega. [30]

Tabel 3.12 Mitteisotermilise topsikatsega saadud difusioonitakistustegurid

Katsekeha	Netokuivtihedus, kg/m³	Difusioonitakistustegur □
AB5-05 B1-8	549	4,7
AB5-05 B1-9	625	5,3
DB8-01-42	780	6,7
DB8-01-44	867	7,4

Mitteisotermilise topsikatse puhul on veeauru ja vedeliku voog materjalis erineva suunaga, kuna nende transpordi potentsiaalid on erinevad. Nagu eelnevalt mainitud, on veeauru transpordi potentsiaaliks veeauru osarõhkude erinevus materjali eri külgedel, vedela vee transpordi potentsiaaliks aga poorirõhkude erinevus.

Antud tingimuste juures, kus ruumiõhk oli 23 □C ning 50 % RH ja topsis oli 5 □C ning 87 % RH, toimus veeauruvoog topsi poole ja vedelikuvoog vastupidi. Veeauru transpordi potentsiaal oli siiski suurem ning vedelikuvoog ei avaldanud summaarse transpordi suunale muutvat mõju.

Mitteisotermilise topsikatse metoodikat tuleks järgnevate uuringute raames arendada, kuna antud ülesehituse juures loksus kohati kaalumise käigus tops niivõrd, et soolalahus sattus materjali pinnale, mis omakorda muudab materjali käitumist. Samuti oli märgata teatavat kondensaadi teket topsi pinnale. Need asjaolud tekitavad teatud kaheldavust antud tulemuste usaldusväärsuses, kuid tegemist oligi rohkem eksperimentaalse katsega. Modelleerimises kasutati standardijärgsete isotermiliste topsikatsete tulemusi.

4. MODELLEERIMISEKS VEDELIKU- NING AURUJUHTIVUSKÕVERATE KOOSTAMINE

Modelleerimise tarbeks loodi materjalifail 500 kg/m^3 sihttihedusega materjali kohta. Keskmise tiheduse järgi nimetati materjal „Kiudmull 628 kg/m^3". Lisaks niiskuslikele omadustele on modelleerimiseks vaja ka soojuslikke omadusi. Antud materjali soojuslikke omadusi uuriti TalTechi poolt „Liginullenergiahoonete ehituseks sobiva mullbetoonkomposiitmaterjali arendusprojekt" raames. Siin peatükis toodud juhtivuskõverad tuletas ning modelleerimiseks sobiva materjalifaili koostas Paul Klõšeiko. [35]

4.1.1 Adsorptsioon- ja desorptsioonkõverad

Adsorptsioon- ja desorptsioonkõverate tuletamiseks sobitati mõõtmistulemustele standardne lähendkõver. Lähteandmetena kasutati vastavalt järgmiseid tulemusi [35] [38]:

- Adsorptsioonkõver:
  - Hügroskoopse niiskuspiirkonna tasakaaluniiskused
  - Kapillaarküllastus veeimavuse katsest
  - Kui tuletatud kõver oli mõnes punktis kõrgemal kui desorptsioonkõver, lisati fiktiivsed punktid desorptsioonkõverast madalamale
- Desorptsioonkõver:
  - Vaakumküllastus
  - Kastepunktipsühromeetriga leitud tasakaaluniiskused
  - Hügroskoopse niiskuspiirkonna tasakaaluniiskused

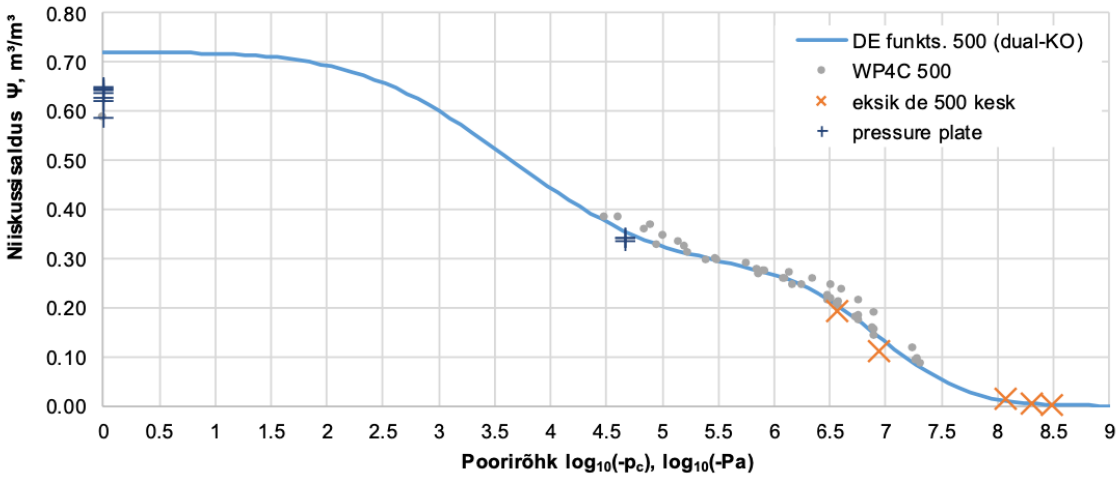
Sobivaimaks funktsiooniks nii ad- kui desorptsioonkõvera puhul osutus kahemodaalne Kosungi funktsioon lühend dual-KO [38]:

$$S_e = w_1 Q\left(\frac{\ln(\frac{h}{h_{m1}})}{\sigma_1}\right) + (1-w_1) Q\left(\frac{\ln(\frac{h}{h_{m2}})}{\sigma_2}\right) \tag{4.1}$$

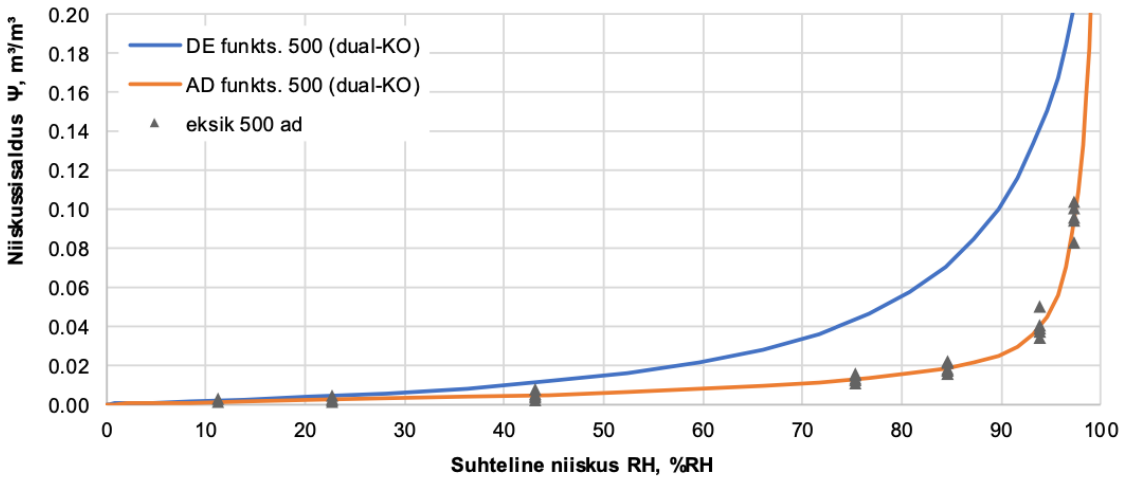
$$Q(x) = erfc(\frac{x}{\sqrt{2}})/2 \tag{4.2}$$

Tabel 4.1 Sorptsiooni lähendkõvera parameetrid [35]

Kõver	θ	w_1	h_{m1}	σ_1	h_{m2}	σ_2
Adsoroptsioon	0,29	0,87981	1929600	0,92067	23606000	1,4528
Desorptsioon	0,72	0,61038	4473,6	2,4695	8613900	1,4709



Joonis 4.1 Desorptsioonkõvera lähend ja võrdlus mõõtmistulemustega, kus „WP4C" tähistab kastepunktipsühromeetrit, „eksik" tähistab hügroskoopse piirkonna mõõtmistulemusi ning „pressure plate" tähistab rõhuplaadimasinat [35]



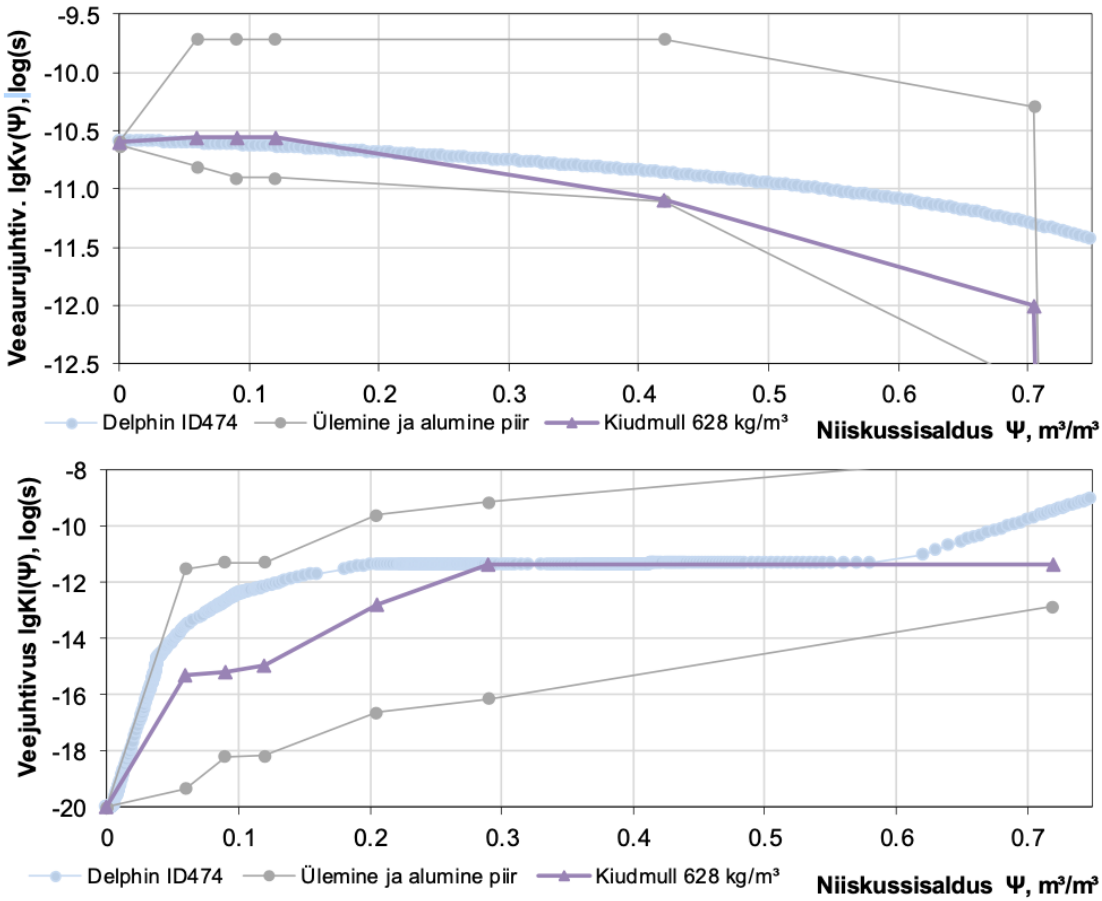
Joonis 4.2 Ad- ja desorptsioonkõvera lähendid koos hügroskoopse niiskuspiirkonna adsorptsiooni mõõtmistulemustega[35]

4.1.2 Vedeliku- ja aurujuhtivuskõverad

Vedeliku- ja aurujuhtivuskõverad tuletati mitme katse mõõtmistulemuste põhjal. Kasutati modelleerimise ja mõõtmistulemuste alusel järk-järgulist parameetrite optimeerimist, mille põhjal saavutati materjaliomadused, mis olid kõige sarnasemad mõõtmistulemustele. [35][39] Lähteandmetena kasutati järgmiste katsete tulemusi:

- Desorptsioonkõver
- Kuivamiskatse
- Kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse
- Veeimavuskatse

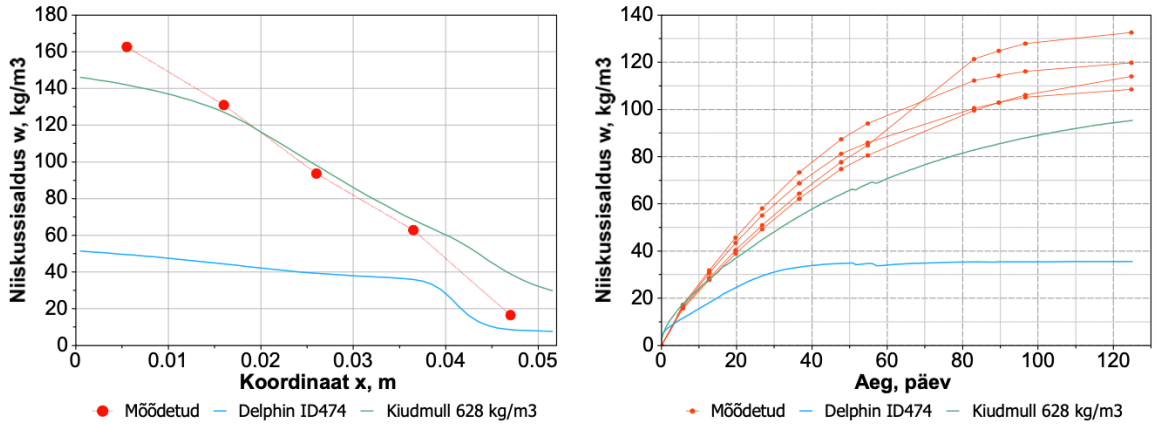
- Aurujuhtivuse katse märja topsi meetodil



Joonis 4.3 Mõõtmistulemuste põhjal tuletatud auru- ja vedelikujuhtivused ning võrdlus Delphini andmebaasist pärit sarnase materjaliga [35]

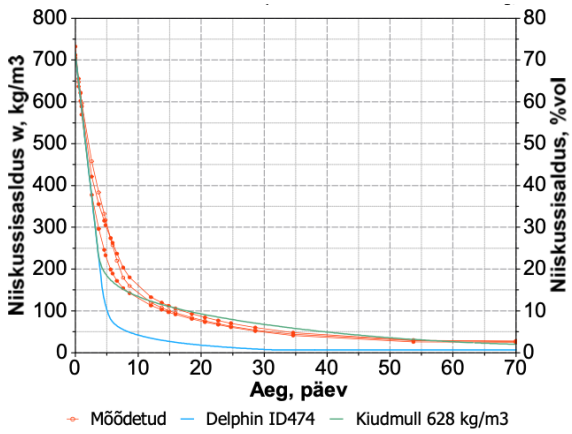
5. TULEMUSTE VÕRDLUS ARVUTUSTARKVARA ANDMEBAASIST PÄRIT MATERJALIDEGA

Mõõtmistulemuste põhjal loodud materjalifaili kasutades modelleeriti läbi kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse ning kuivamiskatse. Saamaks teada, kuidas mõjutab modelleerimise täpsust juhtivusköverate loomisel kasutatud mõõtmiste ehk sisendite arv, võrreldi tulemusi tarkvara andmebaasis oleva sarnase materjaliga ID 474 „Cellular Concrete Ytong". Antud materjali soojuserijuhtivust korrigeeriti vastavalt selle töö raames uuritud kiudmullbetooni soojuserijuhtivusele. Nagu enamuste andmebaasis leiduvate materjalide puhul, nii ei ole ka selle materjali juhtivusköverate loomisel arvestatud kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise andmeid.



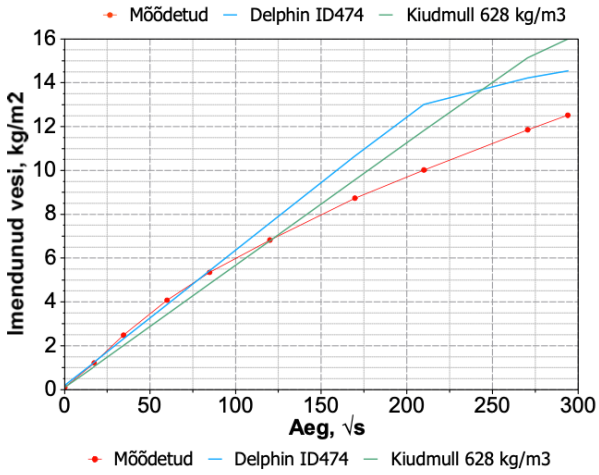
Joonis 5.1 Kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse mõõtmistulemuste, loodud materjalifailiga modelleerimise ning andmebaasist pärit materjalifailiga modelleerimise võrdlus; vasakul niiskussisalduse jaotus katsekeha kõrguses katse lõpus ning paremal kogu katsekeha niiskussisalduse muutus ajas [35]

Võrdlusest on näha, et andmebaasist pärit materjaliga modelleerides, alahinnatakse niiskussisaldust tugevalt. Vaadates niiskussisalduse jaotust katsekeha vertikaalis, siis kriitilisemas ehk madalamas osas alahindab ID 474 materjal niiskussisaldust ligi kolm korda. Sarnane niiskussisalduste vahe on näha ka tervete katsekehade niiskussisaldustes katse lõpus. Ka „Kiudmull 628 kg/m^3" materjal ei anna modelleerides päris täpseid tulemusi, kuna parameetrite optimeerimisel ei õnnestunud saavutada olukorda, kus nii kuivamiskatse kui kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse tulemused saaksid korraga ühtida. [35]



Joonis 5.2 Kuivamiskatse mõõtmistulemuste, loodud materjalifailiga modelleerimise ning andmebaasist pärit materjalifailiga modelleerimise võrdlus [35]

Kuivamiskatse tulemustes on näha samasugust tendentsi, nagu kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise puhul. Andmebaasist pärit materjaliga modelleerides ülehinnatakse tugevalt kuivamise kiirust ning alahinnatakse niiskussisaldust.



Joonis 5.3 Kapillaarse veeimavuse katse mõõtmistulemuste, loodud materjalifailiga modelleerimise ning andmebaasist pärit materjalifailiga modelleerimise võrdlus [35]

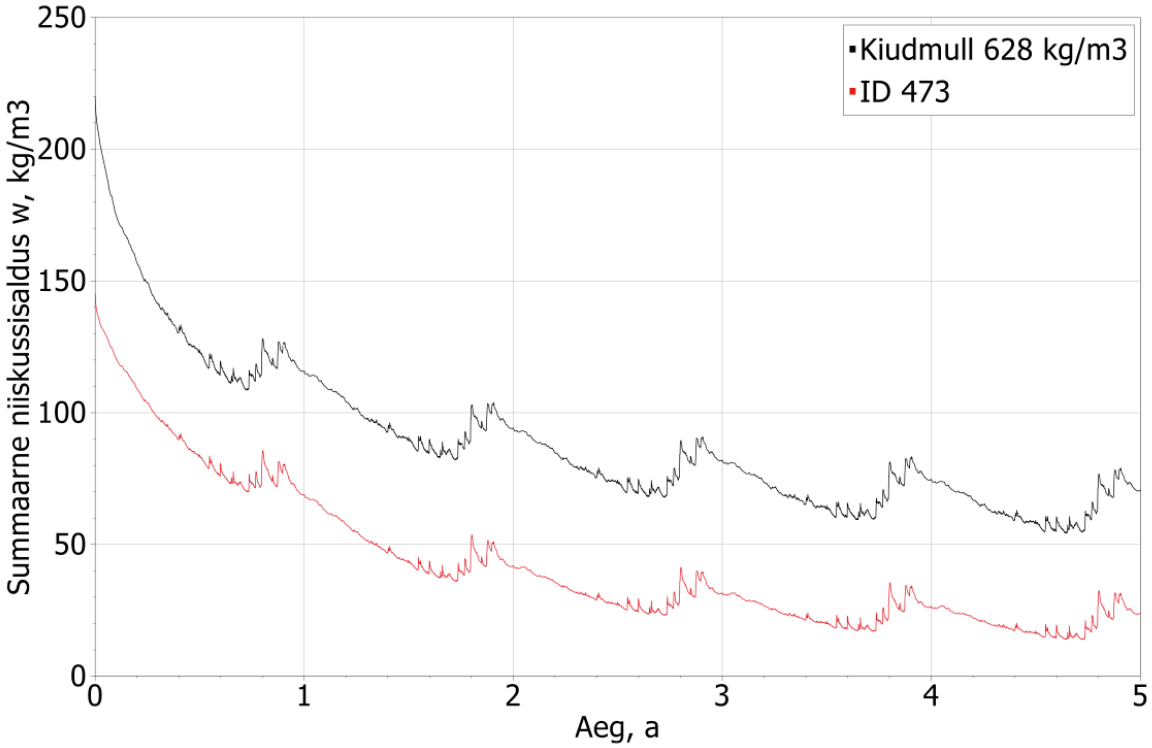
Veeimavuse puhul ei ole erinevused modelleerimistulemuste vahel niivõrd drastilised, kui eelneva kahe katse puhul. Katse alguses ei ole märgatavat vahet ühegi kolme tulemuse vahel. Vahe tuleb sisse katse lõpus, kus modelleeritud tulemused eeldavad lineaarset massikasvu, kuid mõõdetud tulemuste põhjal vee imendumise kiirus katse edenedes veidi langeb.

Materjaliomaduste modelleerimise puhul on juhtivuskõverate loomisel sisendite piisav arv ning eriti kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse andmete lisamine kriitilise tähtsusega. Vastasel juhul võib tekkida olukord, kus modelleerimine annab reaalse olukorraga võrreldes oluliselt optimistlikuma tulemuse ehk viga on tagavara kahjuks.

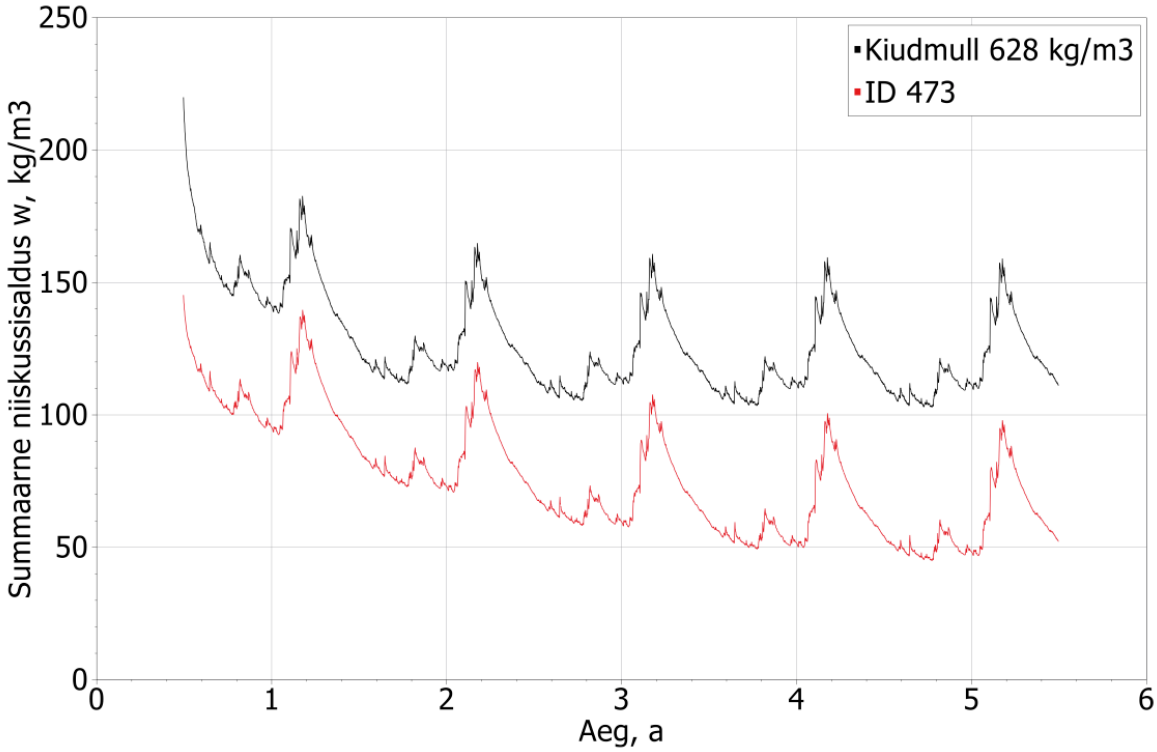
6. NÄITLIKE TÜÜPTARINDITE MODELLEERIMINE

6.1 Poorbetooni niiskussisaldused

Joonistel 6.1 ja 6.2 on toodud ühekihilise tarindi poorbetooni osa keskmised summaarsed niiskussisaldused. Summaarne niiskussisaldus tähendab siinkohal seda, et arvesse on võetud nii veeauru, vedela vee kui jää massid. Algniiskus anti materjalidele ette massiprotsendina, seega on erinevate tiheduste tõttu ka poorbetooni niiskussisaldused simulatsiooni alguses erinevad mõõdetuna kg/m^3. Nagu eelnevalt välja on toodud, ongi poorbetooni tasakaaluniiskus seda kõrgem, mida tihedam ta on.



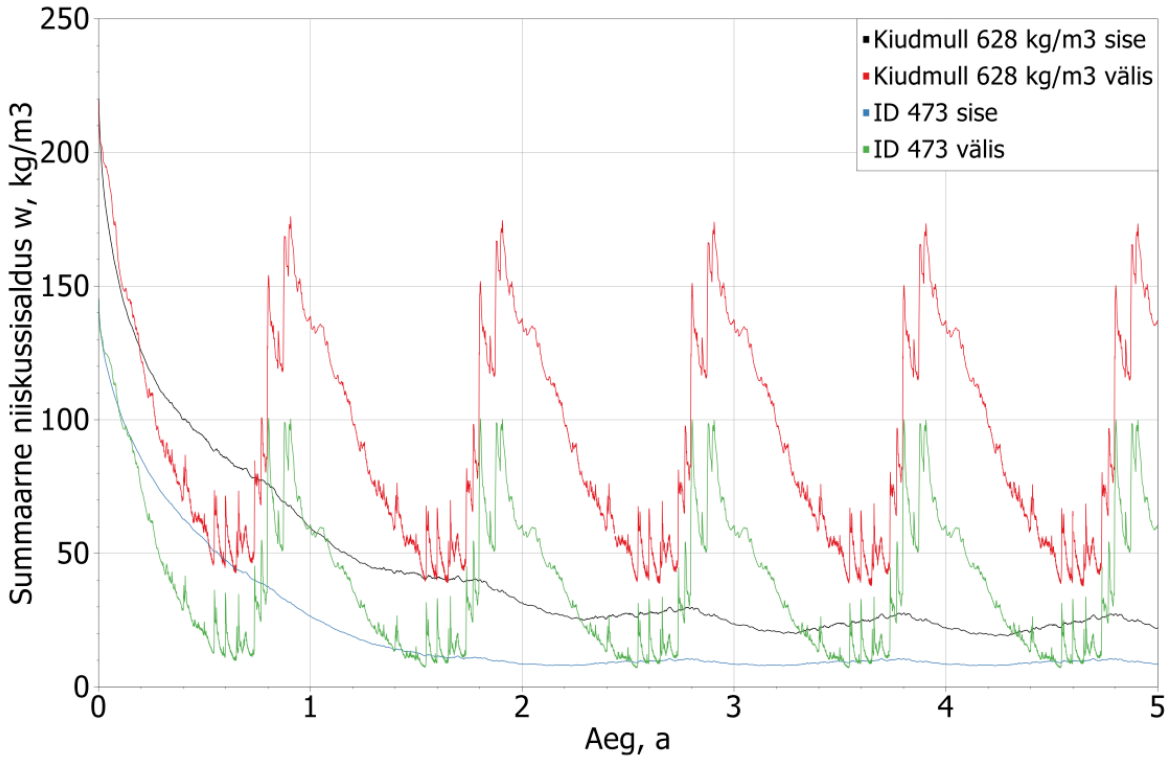
Joonis 6.1 Ühekihilise seina poorbetooni niiskussisaldused kondensaadi testaastaga



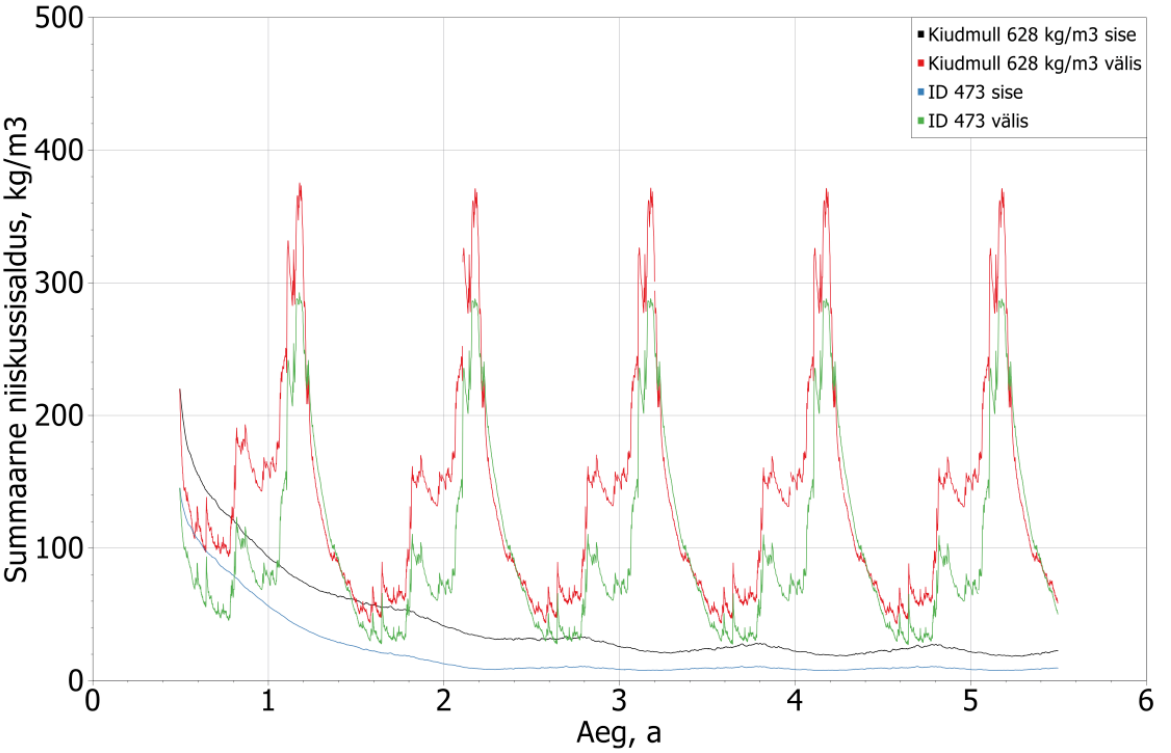
Joonis 6.2 Ühekihilise seina poorbetooni niiskussisaldused hallituse testaastaga

Nii kondensaadi kui hallituse testaastaga modelleerides oli kahe materjali käitumine ühekihilise seina puhul omavahel üpris sarnane. Antud niiskusvahemikus on nende kahe materjali juhtivuskõverad piisavalt sarnased, et nii algniiskuse väljakuivamise kiirus kui materjalide edasine käitumine on väga sarnane, erinedes vaid niiskussisalduse poolest vastavalt tasakaaluniiskusele.

Märgatav üldine niiskussisalduste erinevus oli kondensaadi ja hallituse testaastaga modelleerides. Hallituse testaasta puhul olid niiskussisaldused ajahetkel ligikaudu 70 kuni 80 kg/m^3 kõrgemad kui kondensaadi testaasta puhul. See tuleneb väliskliima erinevusest, kuna kondensaadi testaasta keskendub madalamale temperatuurile ning hallituse testaasta kõrgemale suhtelisele niiskusele.



Joonis 6.3 Kolmekihilise seina sise- ja väliskooriku poorbetooni niiskussisaldused kondensaadi testaastaga

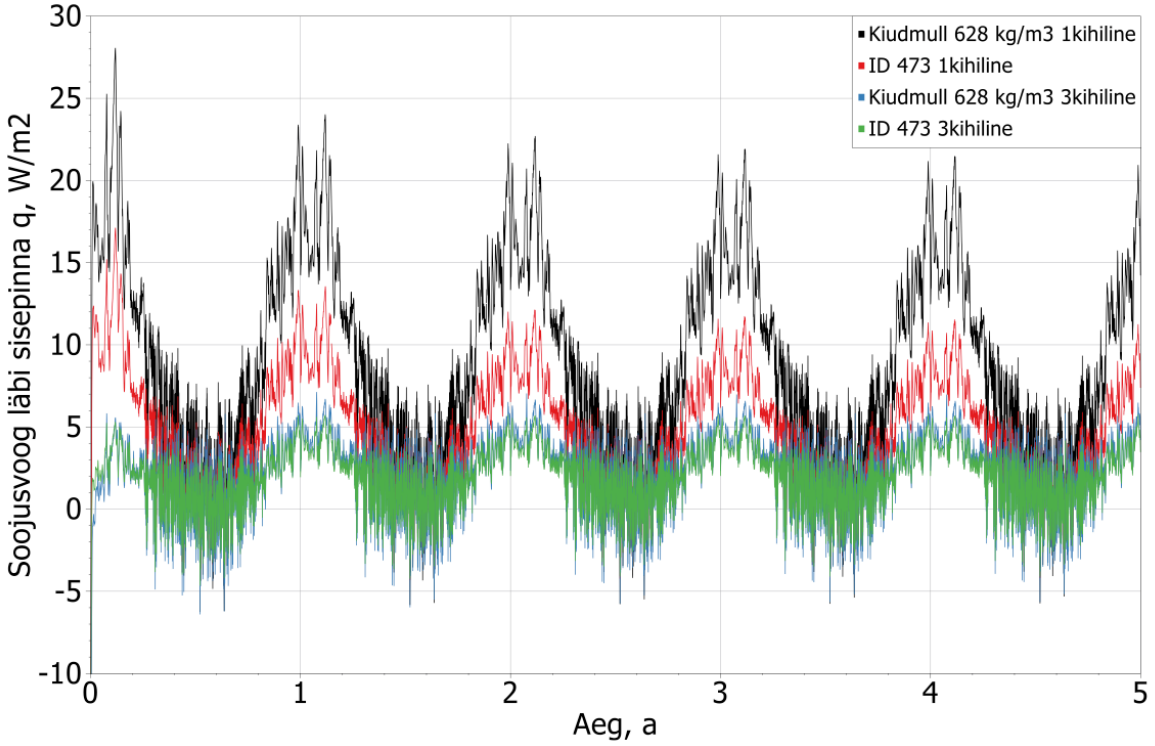


Joonis 6.4 Kolmekihilise seina sise- ja väliskooriku poorbetooni niiskussisaldused hallituse testaastaga

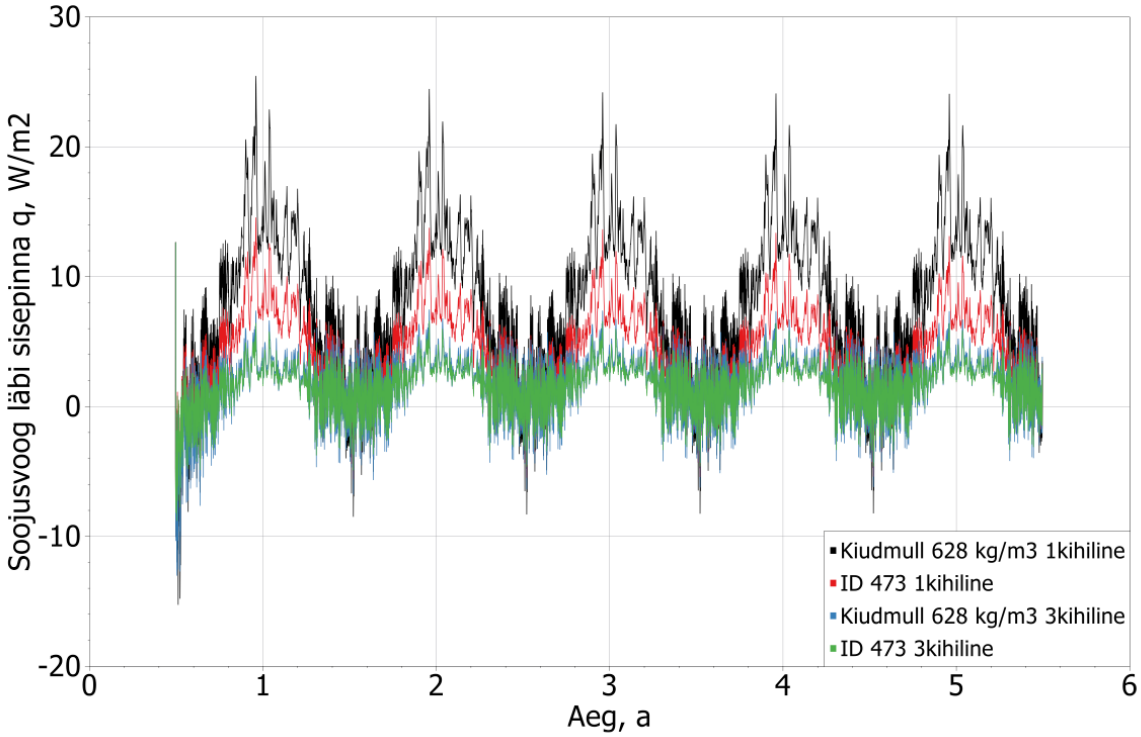
Kolmekihilise tarindi puhul oli märgata sarnaseid trende nagu ühekihilise puhul. Sisekoorik asub soojades ning väliskliimast vähe mõjutatud tingimustes, mis lubab sellel edukalt algniiskusest välja kuivada ning hoida püsivalt madalat niiskussisaldust. Tarindi niiskusliku toimivuse kohapealt sisekoorik määravat rolli ei mängi.

Materjaliomaduste ja kliimatingimuste selge mõju avaldus väliskooriku niiskussisaldustes, nagu näha joonistelt 6.3 ja 6.4. Kondensaadi testaasta puhul käitus väliskooriku niiskussisaldus sarnaselt ühekihilise seina niiskussisaldusele, kuid oli sügis-talvel kuni ligikaudu 100 kg/m^3 kõrgem ning suvisel ajal kuni ligikaudu 20 kg/m^3 madalam. Talvel on soojustuskihi tõttu on temperatuur väliskoorikus madalam ning suvel avaldub päikese mõju ning samuti soojustuse kõrge veeaurutakistus. Kui ühekihilise seina puhul oli niiskussisaldus simulatsiooni lõpus veel üldises langustrendis, siis kolmekihilise seina väliskooriku algniiskuse väljakuivamine lõppes sisuliselt esimese aasta jooksul. Sarnane nähtus, kuid veelgi suuremate erinevustega, esines ka hallituse testaastaga modelleerides.

6.2 Soojusvoog



Joonis 6.5 Soojusvoog läbi tarindi sisepinna kondensaadi testaastaga

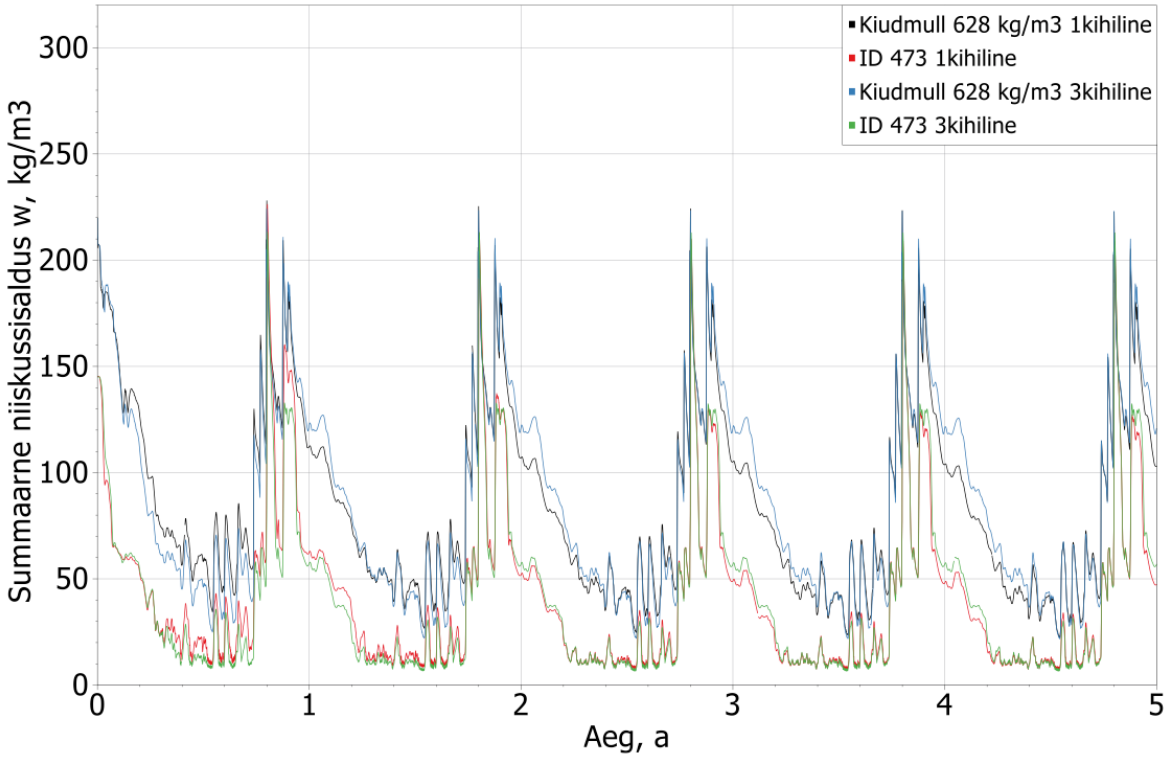


Joonis 6.6 Soojusvoog läbi tarindi sisepinna hallituse testaastaga

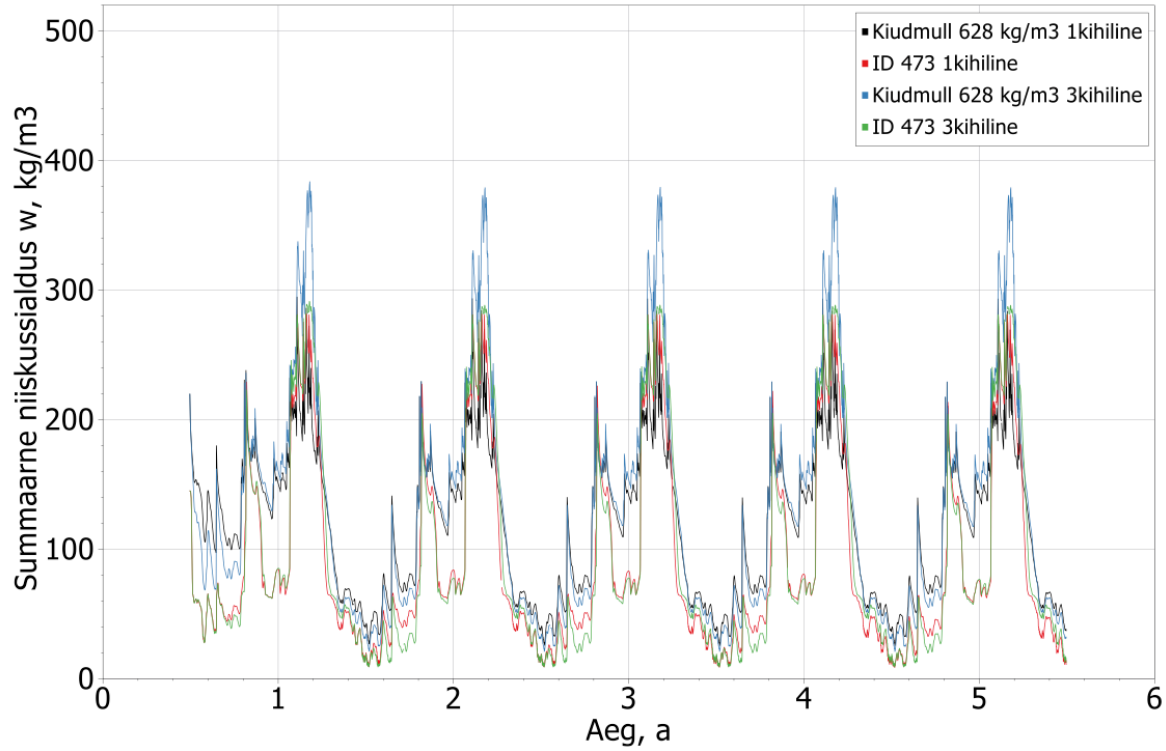
Ootuspäraselt olid ühekihiliste tarindite soojusvood kõrgemad kui kolmekihilistel, see tuleneb soojustuskihi mõjust. Poorbetoonide omavahelise tiheduste, soojuserijuhtivuste ning niiskussisalduste erinevuse tõttu oli talvisel perioodil „Kiudmull 628 kg/m^3" materjaliga tarindi soojusvoog märgatavalt kõrgem kui tarkvara andmebaasist pärit ID 473 materjaliga seinal. Nagu eelnevalt mainitud, on kondensaadi testaasta puhul temperatuurid madalamad, seega on ka tarindite soojusvood üldiselt sel juhul kõrgemad kui hallituse testaastaga modelleerides.

6.3 Niiskussisaldus ja temperatuur välispinna lähedal

Niiskusliku toimivuse koha pealt kõige kriitilisemad tingimused, ehk madal temperatuur, ja kõrge niiskussisaldus, on üldiselt tarindi välispinna lähedal. Seetõttu avaldati modelleerimise käigus ka niiskussisaldused ja temperatuurid poorbetooni välimisest pinnast ligikaudu 20 mm kaugusel.

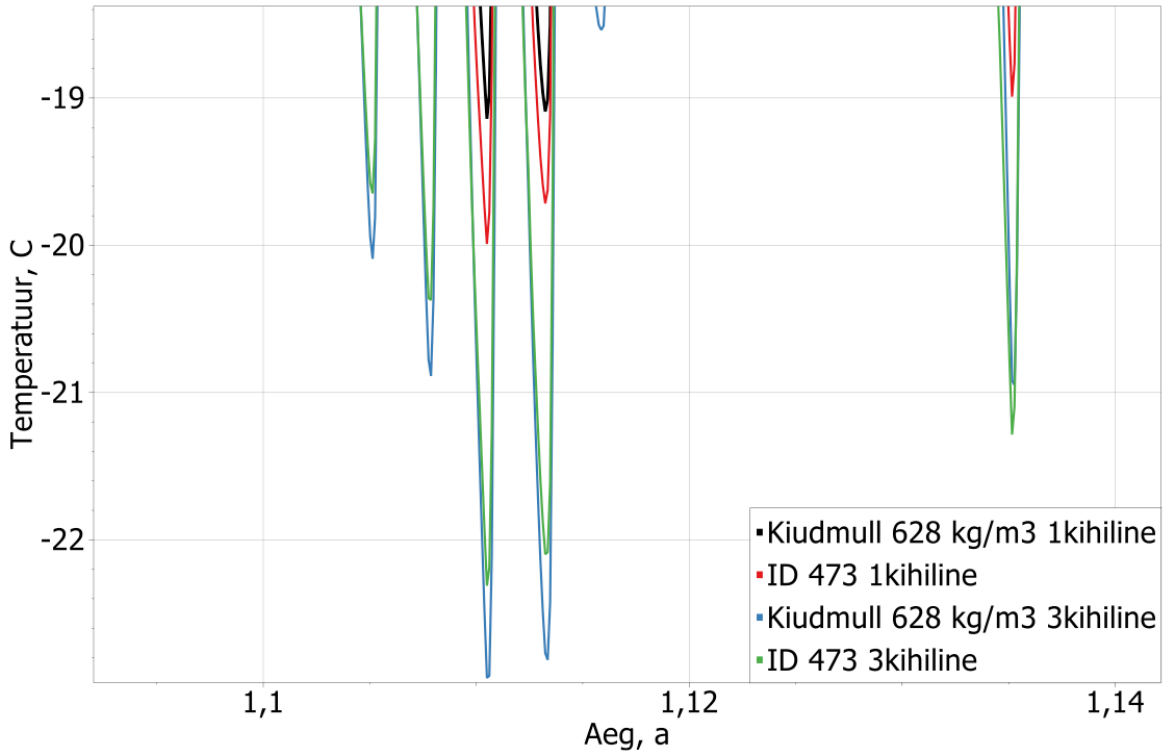


Joonis 6.7 Poorbetooni niiskussisaldused umbes 20 mm kaugusel poorbetooni välispinnast kondensaadi testaastaga

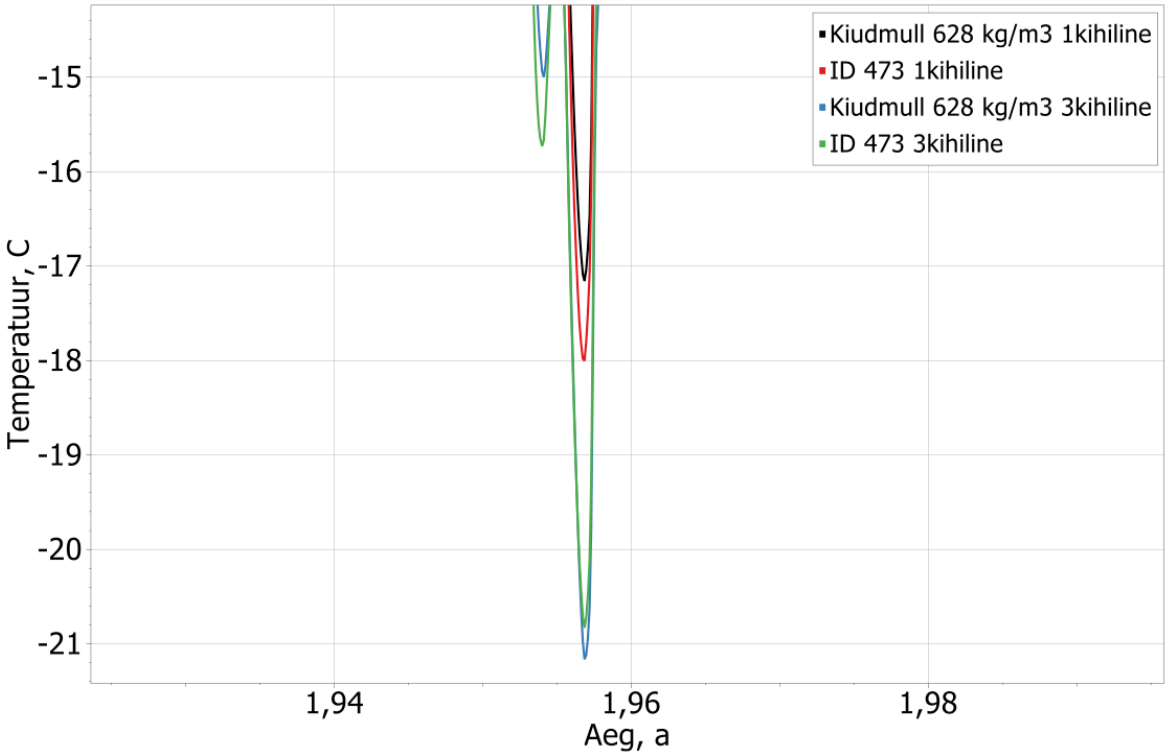


Joonis 6.8 Poorbetooni niiskussisaldused umbes 20 mm kaugusel poorbetooni välispinnast hallituse testaastaga

Võrreldes joonistel 6.7 ja 6.8 toodud niiskussisaldusi välispinna lähedal eelnevalt välja toodud väliskooriku või kogu poorbetooni niiskussisaldustega, on näha, et välispinna lähedal toimuv mõjutab tarindi ja materjali niiskuslikku toimivust oluliselt, kuna niiskussisaldus välispinna lähedal on kõrgem kui keskmine.



Joonis 6.9 Poorbetooni temperatuurid umbes 20 mm kaugusel poorbetooni välispinnast kondensaadi testaastaga talvisel perioodil



Joonis 6.10 Poorbetooni temperatuurid umbes 20 mm kaugusel poorbetooni välispinnast hallituse testaastaga talvisel perioodil

Välispinna lähedal on talvisel perioodil niiskussisaldused kõrged ning, nagu joonistelt 6.9 ja 6.10 näha, temperatuurid madalad. Selline olukord viitab suuremale külmakahjustuste ohule.

Välispinna lähedal oli antud töös uuritud materjali niiskussisaldus kohati kuni 80 kg/m^3 kõrgem kui andmebaasist pärit materjali puhul. Arvestades, et temperatuur talvisel ajal ligi 1 □C võrra madalam, on selline vahe niiskussisalduses kriitiline. Niiskussisalduse tõustes ja temperatuuri langedes kasvab külmakahjustuste oht.

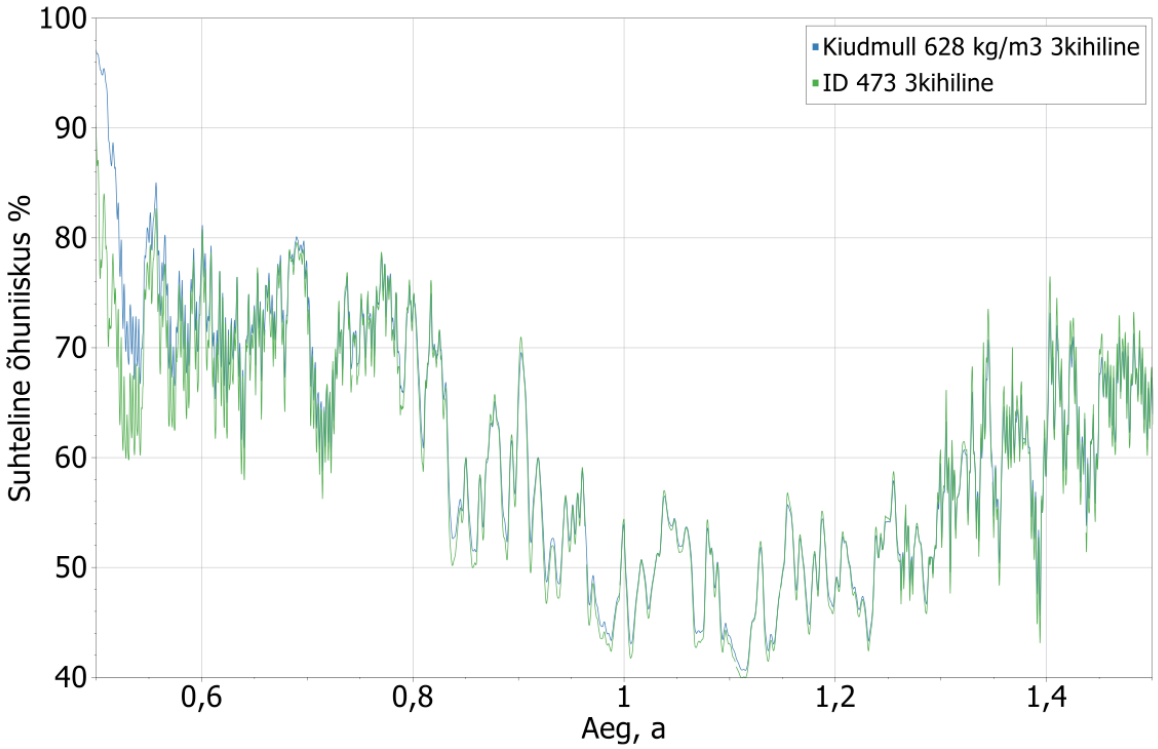
ID 473 materjalifaili loomisel ei ole arvestatud kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse tulemustega ning sarnaselt eelnevalt tehtud võrdlustega, andis andmebaasist pärit materjal positiivsemad tulemused tarindi soojus- ja niiskustehnilise toimivuse kohta. Seega on suur oht, et simulatsioonid, mis on tehtud materjaliomadustega, mille loomisel ei ole kasutatud piisavalt palju sisendeid, eksivad tagavara kahjuks ja annavad reaalsusega võrreldes leebemaid tulemusi.

6.4 Hallituse kontroll sisepinnal

Modelleerimise käigus arvutati VTT hallitusindeksid seina sisepinnal. Mõlema tarinditüübi puhul oli algniiskuse väljakuivamise ajal hallitusindeks väga lühiajaliselt

umbes 0,037 ning peale seda läks nulli. Hallitusindeks 0 tähendab hallituse ohu puudumist ning 0,037 on väga madal, arvestades, et hallitusindeksi skaala on 0 kuni 6. Seega võib öelda, et seina sisepinnal hallituse oht puudub. [40]

Ka suhtelised niiskused olid tarindi sisepinnal sarnased. Nagu näha jooniselt 6.11, on antud töös uuritud materjali puhul kolmekihilise seina sisepinna suhteline niiskus halituse testaastaga tehtud simulatsioonis veidi kõrgem kui andmebaasist pärit materjali puhul. Samas on vahe marginaalne ning nagu näitas võrdväärne hallitusindeks, siis mõju see vahe ei avalda.



Joonis 6.11 Suhteline õhuniiskus tarindi sisepinnal hallituse testaastaga modellerides esimese aasta jooksul

KOKKUVÕTE

Töö raames teostati eksperimentaalselt toodetud kiudmullbetooni niiskuslike omaduste laiapõhjaline katseline uurimine. Kõik eksperimendid viidi läbi nii 500 kui 800 kg/m^3 sihttihedusega materjalidega.

Arvestades asjaolu, et tegemist oli antud materjali esimeste proovitootmistega, oli oodata, et materjaliomaduste hajuvus on võrdlemisi suur. Eriti selgelt avaldus see netokuivtiheduste määramisel, kus väärtuste amplituud oli suur. Näiteks sihttihedusega 500 kg/m^3 materjali puhul oli amplituud sõltuvalt partiist 84 kuni 128 kg/m^3 ning kõik väärtused olid sihttihedusest kõrgemad, seega vajab tootmisprotsess veel tugevat arendustööd.

Ootuspäraselt oli kiudmullbetooni tasakaaluniiskus desorptsioonil kõrgem kui adsorptsioonil ning kuni suhtelise niiskuseni umbes 90 % on tasakaaluniiskused madalad ning hajuvus võrdlemisi väike. Kõrgema suhtelise niiskuse juures hakkab tasakaaluniiskus järsult tõusma ning avaldub ka selge hüsterees ehk ad- ja desorptsiooni tasakaaluniiskuse erinevus. Hügroskoopses niiskuspiirkonnas ei tekkinud selget seost materjali tiheduse ja niiskussisalduse vahel.

Ülehügroskoopses niiskuspiirkonnas oli märgata erinevust niiskussisalduses sõltuvalt materjali tihedusest, kus kõrgema tihedusega katsekehade tasakaaluniiskused olid kõrgemad. Suhtelise niiskuse kasvades kasvas ka niiskussisalduste hajuvus. Kastepunktipsühromeetriga õnnestus mõõta ülehügroskoopse piirkonna madalamat osa, kuid kõrgem osa, mida mõõdetakse rõhuplaadiga, jäi tehniliste tõrgete tõttu enamuses mõõtmata. Kõrvutades hügroskoopse piirkonna mõõtmisi, kastepunktipsühromeetri tulemusi ja rõhuplaadi tulemusi, mis omavahel osaliselt kattuvad, selgus, et ühtlast sorptsioonkõverat nendest tuletada ei õnnestunud.

Kapillaarse veeimavuse koefitsiendid olid mõlema materjali puhul kirjandust arvestades veidi ootuspärasest madalamad ning see võib olla seletatav kiudude mõjuga poorbetooni omadustele. Suurema tihedusega materjali veeimavuse koefitsiendid olid selgelt kõrgemad kui madalama tihedusega materjali puhul, mida oli ka oodata.

Kuivamiskatse tulemuste põhjal sai materjali kuivamise vaakumküllastatud olekust jagada kahte etappi. Esimeses etapis on kuivamine kiire ning massikadu ajas lineaarne ja see kestab 3 kuni 5 päeva. Peale seda kuivamine oluliselt aeglustus, kuna niiskus hakkas liikuma pinnale veeauru, mitte vedelikuna. Katsekehade kuivamine oli seda kiirem, mida madalam oli nende tihedus.

Kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse eesmärgiks oli mõõta mullbetooni kui kapillaaraktiivse materjali võimet jaotada külmal pinnal tekkinud kondensaati ümber materjali sisemuses. Tulemustest selgus, et materjali niiskussisalduse langus materjali külmemas pooles oli seda suurem, mida väiksem oli tema tihedus. Poolest kõrgusest edasi ei tekkinud märgatavat erinevust materjali käitumises sõltuvalt tihedusest. Niiskussisalduse jaotust katsekeha kõrguses viilutamise teel peaks metoodika koha pealt edasistes uurimustes arendama. Võrreldes kogu katsekeha niiskussisaldust ja horisontaalsete viilude niiskussisalduste keskmist, on näha arvestatavat niiskuskadu protseduuride käigus.

Veeaurujuhtivuse määramine isotermilistes tingimustes andis kirjandust arvestades ootuspäraseid tulemusi. Materjali difusioonitakistustegur oli seda kõrgem, mida kõrgem oli materjali tihedus ning seda madalam, mida kõrgem oli tema niiskussisaldus, kuna kõrgema niiskussisalduse juures hakkab mõju avaldama ka vedelikujuhtivus. Mitteisotermilistes tingimustes kasvas materjali difusioonitakistustegur, kuna vedeliku- ja veeauruvoog on vastupidised. Mitteisotermilistes tingimustes veeaurujuhtivuse mõõtmise metoodikat on vaja arendada, kuna antud meetodi juures tekkisid probleemid kondensaadiga topsi pinnal ning soolalahuse loksumisega katsekeha pinnale.

Lähtuvalt eksperimentide käigus kogutud andmetele, tuletati materjaliomaduste modelleerimise tarbeks ad- ja desorptsioonkõverad ning auru- ja vedelikujuhtivuse kõverad. Nende abil loodi materjalifail, mida sai kasutada dünaamilises soojus- ja niiskustehnilises modelleerimises. Kuivamiskatse ja kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise katse modelleeriti ning võrreldi seda tarkvara andmebaasist pärit sarnase materjaliga. Selgus, et andmebaasist pärit materjalifail, mille loomisel ei arvestatud kapillaarse kondensaadi ümberjaotumise tulemusi, ülehindas mõlema katse puhul materjali toimivust ja andis reaalsusest tunduvalt optimistlikumad tulemused.

Antud materjalifaili kasutati ka kiudmullbetooni ühe potentsiaalse kasutusväljundi ehk tehaseliselt toodetud seinapaneeli soojus- ja niiskustehniliseks dünaamiliseks modelleerimiseks Eesti kliimas. Mudelid koostati nii ühekihilise kui kolmekihilise seinapaneeliga, kus kahe poorbetoonist kooriku vahel on soojustuseks polüuretaanvaht. Samad tarindid modelleeriti ka tarkvara andmebaasist pärit sarnase poorbetooniga. Andmebaasist pärit materjaliga tehtud simulatsioonid andsid võrreldes antud töös uuritud materjaliga positiivsemaid tulemusi. Seega on suur oht, et simulatsioonid, mis on tehtud materjaliomadustega, mille loomisel ei ole kasutatud piisavalt palju sisendeid, eksivad tagavara kahjuks ja annavad reaalsusega võrreeldes leebemaid tulemusi.

ENGLISH SUMMARY

Within the framework of this thesis, a comprehensive experimental investigation of the hygric properties of experimentally produced fiber reinforced aerated concrete was carried out. All the experiments were carried out with both 500 and 800 kg/m^3 target density materials.

Considering the fact that these were the first trial productions of this material, it was expected that the dispersion of material properties would be relatively high. This was particularly evident in the determination of net dry densities, where the range of the values was high. For example, for a material with a target density of 500 kg/m^3, the amplitude ranged from 84 to 128 kg/m^3, depending on the batch, and all values were above the target density, so the production process still needs strong development.

As expected, the equilibrium moisture content of fiber reinforced aerated concrete was higher for desorption than for adsorption, and up to a relative humidity of about 90 %, the moisture content is low and the dispersion relatively small. At higher relative humidity, the equilibrium moisture content starts to rise sharply and a clearer hysteresis, i.e. the difference in equilibrium moisture content between adsorption and desorption, is also evident. In the hygroscopic moisture range, no clear relationship between material density and moisture content was found.

In the overhygroscopic moisture range, a difference in moisture content as a function of material density was observed, with higher equilibrium moisture content for higher density test specimens. As the relative humidity increased, the dispersion of moisture contents also increased. The dew-point psychrometer was able to measure the lower part of the overhygroscopic range, but the higher part, which is measured with a pressure plate apparatus, remained mostly unmeasured due to technical difficulties. By comparing the measurements of the hygroscopic range, the results of the dew-point psychrometer and the results of the pressure plate, which all partially overlap, it became clear that a united sorption curve could not be derived.

The capillary water uptake coefficients for both materials were slightly lower than expected considering the literature and this may be explained by the effect of the fibers on the properties of the aerated concrete. The water uptake coefficients of the higher density material were clearly higher than those of the lower density material, as expected.

Based on the results of the drying experiment, the drying of the material from the vacuum saturated state could be divided into two stages. In the first stage, the drying is rapid and the mass loss is linear over time, lasting for 3 to 5 days. After that, the

drying slowed down significantly as moisture started to move to the surface as water vapor instead of liquid. The lower the density of the test specimens, the faster they dried.

The aim of the capillary condensation redistribution test was to measure the ability of aerated concrete, as a capillary-active material, to redistribute condensation formed on a cold surface into the interior of the material. The results showed that the lower the density of the material, the greater the decrease in moisture content in the colder half of the material. There was no noticeable difference in the behaviour of the material as a function of density from half the height upwards. The methodology of measuring the distribution of moisture content in the height of the test specimen by slicing should be further developed in future studies. Comparing the moisture content of the whole test specimen and the average moisture contents of the horizontal slices, a significant moisture loss during the procedures can be seen.

Determination of the water vapor conductivity under isothermal conditions gave results as expected considering the literature. The water vapor diffusion resistance factor of the material was higher the higher the density of the material and lower the higher the moisture content of the material. The higher the moisture content, the more the liquid conductivity starts to affect the moisture transport. Under non-isothermal conditions, the water vapor diffusion resistance factor of the material increased because the liquid and water vapor fluxes are in the opposite directions. The methodology for measuring the water vapor conductivity under non-isothermal conditions needs to be developed, as problems were encountered with condensation on the surface of the cup and with the salt solution flocculating on the surface of the test specimen.

Based on the data collected during the experiments, adsorption and desorption curves, and vapor and liquid conductivity curves were derived for modelling material properties. These were used to generate a material file that could be used for dynamic hygro-thermal modelling. The drying experiment and the capillary condensation redistribution test were modelled and compared with a similar material from the software database. It was found that the material file from the database, which was created without taking into account the capillary condensation redistribution results, overestimated the performance of the material in both tests and gave much more optimistic results than reality.

This material file was also used for hygro-thermal dynamic modelling of one potential application of fiber reinforced aerated concrete, i.e. factory-produced wall panels, in the Estonian climate. Modelling was carried out with both a single-layer and a triple-layer wall panel with polyurethane foam as insulation between two aerated concrete shells.

The same walls were also modelled with a similar aerated concrete from the software database. The simulations carried out with the material from the database gave more positive results compared to the material studied in this thesis. Thus, there is a high risk that simulations performed with material properties that have not been created with sufficient inputs will be biased against the backlog and will produce results that are less dangerous than reality.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] M. Põldaru, T. Tuisk, L.-M. Raado, and E. Liisma, "Loengukonspekt aines 'Ehitusmaterjalid'"

[2] A. Bonakdar, F. Babbitt, and B. Mobasher, "Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC)," *Cem Concr Compos*, vol. 38, pp. 82–91, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.006.

[3] "ASTM C-1693. Standard specification for precast Autoclaved Aerated Concrete (AAC) wall construction units. ASTM International, PA; 2009.".

[4] M. E. Sutton, „Autoclaved Cellular Concrete, the Future of Fly Ash" In: Proceeding of international ash utilization symposium, paper # 73, University of Kentucky, KY; 1999.

[5] E. Holt and P. Raivio, "Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete," *Cem Concr Res*, vol. 35, no. 4, pp. 796–802, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.005.

[6] C. Rode, M. Schou, and M. Lund, "Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions."

[7] Z. O. Pehlivanli, I. Uzun, and I. Demir, "Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber," *Constr Build Mater*, vol. 96, pp. 428–433, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.104.

[8] Z. O. Pehlivanli, I. Uzun, Z. P. Yücel, and I. Demir, "The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete," *Constr Build Mater*, vol. 112, pp. 325–330, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.223.

[9] Targo Kalamees, "Loengukonspekt aines 'Ehitusfüüsika alused'" 2018

[10] G. A. Scheffler, "VALIDATION OF HYGROTHERMAL MATERIAL MODELLING UNDER CONSIDERATION OF THE HYSTERESIS OF MOISTURE STORAGE," 2008

[11] M. Jerman, M. Keppert, J. Výborný, and R. Černý, "Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete," *Constr Build Mater*, vol. 41, pp. 352–359, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.036.

[12] P. Klõšeiko, "SEESPOOLSE LISASOOJUSTUSEGA TELLISSEINA SOOJUS-JA NIISKUSTEHNILINE TOIMIVUS KOHTLA-JÄRVE KOOLIMAJA NÄITEL," 2014.

[13] P. Klõšeiko, *Hygrothermal Performance of Masonry Walls Retrofitted with Interior Insulation in Cold Climate*. 2022.

[14] "Standard EVS-EN ISO 12570:2000 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of moisture content by drying at elevated temperature." Oct. 01, 2000.

[15] "Standard EVS-EN 772-16:2011 Müürikivide katsemeetodid. Osa 16: Mõõtmete määramine." Jun. 02, 2011.

[16] "Standard EVS-EN ISO 18754:2022 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Determination of density and apparent porosity".

[17] "ASTM E104 – 20a Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions", doi: 10.1520/E0104-20A.

[18] "Standard EVS-EN ISO 12571:2021 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties." Dec. 01, 2021.

[19] "ASTM C1498-04a Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials", doi: 10.1520/C1498-04AR16.

[20] "ASTM C1699-09 Standard Test Method for Moisture Retention Curves of Porous Building Materials Using Pressure Plates", doi: 10.1520/C1699-09R15.

[21] "Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: a comparison of laboratory methods," *Eur J Soil Sci*, vol. 64, pp. 814–821, 2013, doi: 10.1111/ejss.12108.

[22] C. Feng and H. Janssen, "Hygric properties of porous building materials (IV): Semi-permeable membrane and psychrometer methods for measuring moisture storage curves," *Build Environ*, vol. 152, pp. 39–49, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.01.054.

[23] S. M. Munsch, T. Bintz, R. Heyn, H. Hirsch, J. Grunewald, and S. Kruschwitz, "Detailed investigation of capillary active insulation materials by 1 H nuclear magnetic resonance (NMR) and thermogravimetric drying." [Online]. Available: http://www.ndt.net/?id=27205

[24] P. Klõšeiko, T. Valk, M. Põldaru, and T. Kalamees, "Capillary condensation redistribution (CCR) test: measurement results of 5 materials and comparison to modelling."

[25] "Standard EVS-EN ISO 12572:2016 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method." Sep. 05, 2016.

[26] "Standard EVS-EN ISO 15148:2003 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion." May 01, 2003.

[27] K. Koppel, "KOLMEKIHILISE SOOJUSTATUD POORBETOONPANEELI NIISKUSLIKU TOIMIVUSE EELDUSED PRESUMPTIONS OF HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF THREE LAYER AUTOCLAVED AERATED CONCRETE EXTERNAL WALL," 2021

[28] K. Koitmäe, "EESTIS KASUTATAVATE AUTOKLAAVITUD POORBETOONIDE SOOJUSLIKUD JA NIISKUSLIKUD OMADUSED, Hygric and thermal properties of commonly used autoclaved aerated concrete in Estonia." 2015

[29] C. Feng, H. Janssen, C. Wu, Y. Feng, and Q. Meng, "Validating various measures to accelerate the static gravimetric sorption isotherm determination," *Build Environ*, vol. 69, pp. 64–71, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.005.

[30] C. Feng and H. Janssen, "Hygric properties of porous building materials (VII): Full-range benchmark characterizations of three materials," *Build Environ*, vol. 195, May 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107727.

[31] Y. Wang, J. Huang, D. Wang, Y. Liu, Z. Zhao, and J. Liu, "Experimental study on hygrothermal characteristics of coral sand aggregate concrete and aerated concrete under different humidity and temperature conditions," *Constr Build Mater*, vol. 230, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117034.

[32] S. Asamoto, R. Koyama, K. Matsui, and K. Takahashi, "Water absorption characteristics in autoclaved aerated concrete, diatomite, and calcium silicate board," *ce/papers*, vol. 6, no. 2, pp. 278–283, Sep. 2023, doi: 10.1002/cepa.1958.

[33] R. H. Shabbar, "Investigation into the Properties of Aerated and Fibre-Reinforced Aerated Concrete" 2018

[34] C. H. W. Hall, „*Water transport in brick, stone and concrete*" 3rd ed. 2022.

[35] Tallinna Tehnikaülikool, "Liginullenergiahoonete ehituseks sobiva mullbetoonkomposiitmaterjali arendusprojekti lõppraport" 2023.

[36] P. Klõšeiko, T. Valk, M. Põldaru, and T. Kalamees, "Capillary condensation redistribution (CCR) test: measurement results of 5 materials and comparison to modelling."

[37] S. M. Munsch, T. Bintz, R. Heyn, H. Hirsch, J. Grunewald, and S. Kruschwitz, "Detailed investigation of capillary active insulation materials by 1 H nuclear magnetic resonance (NMR) and thermogravimetric drying." [Online]. Available: http://www.ndt.net/?id=27205

[38] K. Seki, "SWRC Fit and unsatfit for parameter determination of unsaturated soil properties," Feb. 2023, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2302.00472

[39] P. Klõšeiko and P. Freudenberg, "Generative reverse-modelling approach to hygrothermal material characterization," 2019, doi: 10.1051/matecconf/201928.

[40] H. Viitanen and A. Ritschkoff, "Mold growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature.," 1991.