



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

KIVIVILLAGA TÄIDETUD SÄNDVITŠPANEELIDE KUIVATAMINE ÕHU LÄBIJUHTIMISE TEEL

DRYING OF STEEL-FACED MINERAL WOOL INSULATED SANDWICH-PANELS BY FORCED CONVECTION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Siim Lomp

Üliõpilaskood 165205

Juhendaja: Targo Kalamees, professor
Kristo Kalbe, ekspert

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"21. juuli" 21.07.2021

Autor: Siim Lomp

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"21. juuli" 21.07.2021

Juhendaja: Targo Kalamees

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Siim Lomp (sünnikuupäev: 26.11.1996)

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

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Targo Kalamees,

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

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

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

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

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

_____ *(allkiri)*

21.07.2021

EHITUSE JA ARHITEKTUURI INSTITUUT

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Siim Lomp, 165205

Õppekava, peaariala: EAEI Ehitusjuhtimine ja ehitiste projekteerimine

Juhendaja(d): Targo Kalamees, professor
Kristo Kalbe, ekspert

Konsultant:

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kivivillaga Täidetud Sändvitšpaneelide Kuivatamine Õhu
Läbijuhtimise Teel

(inglise keeles) Drying of steel-faced mineral wool insulated sandwich-panels by
forced convection

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Määrata seinaelemendi õhuga kuivatamise potentsiaal püsivas temperatuurisoleva katseseina ja sise-ning väliskeskonna vahel oleva katseseina abil.
2. Kalibreerida välisseina mõõtetulemuste abil soojus-janiiskusliku arvutuse mudel.
3. Määrata seinapaneeli õhugakuivatamise strateegia vajalikud parameetrid.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Testseina ehitamine/paika seadistamine	02.05.21
2.	Tulemuste modelleerimine/analüüs	21.06.21
3.	Lõputöö vormistamine	21.07.21

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 21.07.2021a

Üliõpilane: Siim Lomp
/allkiri/

Juhendaja: Targo Kalamees
/allkiri/

Konsultant:
/allkiri/

Programmijuht:
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU	7
1 SISSEJUHATUS	10
1.1 Taust.....	10
1.2 Plekk-soojustus-plekk tüüpi kihtpaneelidest	11
1.3 Uuringu eesmärk.....	12
2 MEETODID	14
2.1 Mõõtmised	14
2.1.1 Katse keskkond	14
2.1.2 Seadmed	18
2.1.3 Testseina ehitamine ja käivitamine.....	19
• Ettevalmistus testseina püstitamiseks	21
• Katse käik.....	28
2.2 Arvutused	29
2.2.1 Arvutustarkvara Delphin 5.9.....	29
2.3 Arvutusmudeli kalibreerimine katsetatud olukorrale.....	33
3 TULEMUSED JA NENDE HINDAMINE	34
3.1 Mõõtmised	34
3.1.1 Õhuvooluhulga valik katsetele	34
3.1.2 Püsiva temperatuurikeskkonna katse katsekehade mõõtetulemused	43
3.1.3 Muutuva temperatuurikeskkonna testseina mõõtetulemused.....	44
3.2 Katse- ja arvutustulemuste võrdlus.....	53
3.3 Kuivatusstrateegiad suve- ja talveperioodil	65
3.3.1 Reaalse seina kuivatamine konvektsiooni teel	65
3.3.2 Kuivatusvariant 1- Talvel soojendatud õhuga.....	68
3.3.3 Kuivatusvariant 2- Suvel kompressori õhuga	74
3.3.4 Kuivatusvariandid 1995-1996 kondensaadi testaasta kliimaga	76
4 TULEMUSTE HINDAMINE	78
5 JÄRELDUSED	79
6 KOKKUVÕTE	80
SUMMARY	81
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	82
LISAD.....	83
LISA 1 MÕÕTETULEMUSED	84
LISA 2 MÕÕTE- JA ARVUTUSTULEMUSTE VÕRDLUS	93
GRAAFILINE OSA	119
Joonis 1.....	119

EESSÕNA

Käesolev magistritöö on läbi viidud koostöös ettevõttega Ruukki Construction Oy (Soome). Töö on plekist välisseinaelementide kuivatamise uuringu teiseks etapiks. Hubert Piikov viis läbi esimese etapi 2020 aastal magistritöö "Kivivillaga sändvitš-paneelist kergseinte niiskustehnilise toimivuse hindamine" raames. Toona uuriti kuivamist difusiooni teel. Käesolev töö hõlmab endas eelmise uuringu katsekehade vabalt ja konvektsiooni teel kuivatamise võrdlust, testseina ehitust, testseina vabalt ja konvektiivselt kuivatamise võrdlust ning kuivatusmetoodika väljatöötamist suve- ja talveperioodil.

Magistritöös kasutatavad andmed on kogutud Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoones teostatud mõõtmiste põhjal ning mõõdetud ääritingimuste abil genereeritud arvutustulemuste põhjal. Testseina püstitamiseks oli tarvis demonteerida eelneva uuringu testsein ning eemaldada sellest andurid, et kasutada neid käesolevas töös. Testseina demonteerimisel ja andurite eemaldamisel olid abiks eelneva testseina püstitaja, Roland Rokka ning kaasjuhendaja Kristo Kalbe. Andurite kalibreerimisel olid abiks kaasjuhendaja Kristo Kalbe, süsteemi haldaja Neeme Takis ning abiline Argo Reintal. Sändvitšpaneelide ja õhuvoolu mõõteseadmed tellis juhendaja Targo Kalamees. Testseina ehitamise ja püstimisega aitas abiline Argo Reintal. Kõigi kaasosaliste abiga valmis 2020 aasta detsembris tekkinud mõttest 2021 aasta mai kuuks toimiv testsein, mille mõõtetulemusi on võimalik jäljendada arvutustarkvaras Delphin 5.9 ning välja töötada strateegiad paneeli õhuga konvektsiooni teel kuivatamiseks.

MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU

Mõisted

Adsorbeerumine - Pinnaenergiast põhjustatud veemolekulide kogunemine materjali pinnale. Suurenenud molekulide kontsentratsioon toob kaasa adsorptsiooni kasvu.

Arvutusmudeli ääritingimused - Arvutusmudeli piirialade elementidele kantavad tingimused, mis defineerivad selle suuruse väärtuse arvutusmudeli piiril ning koos elementide juhtivuse ja ajaga selle suuruse leviku üle arvutusmudeli

Difusioon - Aine liikumine kõrgelt kontsentratsioonilt madalama kontsentratsiooni suunas kuni homogeense segu saavutamiseni

Entalpia - Termodünaamilise süsteemi koguenergia ehk siseenergia ja rõhuenergia summa

Hügrokoopse ala ülempiir - Kivivilla puhul on hügrokoopse ala ülempiiri tingimuseks $RH > 97\%$. Peale selle piiri saavutamist tõuseb materjali niiskussisaldus eksponentsiaalselt kuid pooriõhu suhteline niiskus kasvab minimaalselt.

Hügrokoopsus - Materjali võime ammutada ümbritsevast keskkonnast niiskust ning seda salvestada adsorptsiooni või absorptsiooni teel. Ümbritseva keskkonna pidev väärtus ajas toob kaasa tasakaaluniiskuse saavutamise.

Kondenseerumine - Aine oleku muutus gaasilisest vedelaks

Konvektsioon - Kõrge energiaga osakeste liikumine madalama potentsiaali poole, tõrjudes seejuures eemale madalama energiaga osakesed potentsiaalilangul

Küttevõimsus - Aine soovitud temperatuurile soojendamiseks vajaminev võimsus

Õhuvooluhulk - Õhu kogus mahuliselt mis liigub teatud ajaühiku jooksul.

Soojusmahtuvus - Energia hulk mis on tarvilik aine massiühiku temperatuuri tõstmiseks ühe temperatuuriühiku võrra

Soojusvoog - Energia kogus, mis läbib ühikpinda ajaühiku jooksul

Suhteline niiskus - Õhus oleva veeauru osarõhu ja veeauru küllastusrõhu suhe samal temperatuuril

Sändvitšpaneel - Kihiline ehituselement, mis koosneb kihtidest. Keskmine kiht on soojusisolatsiooni materjal ning välimiste kihtide eesmärk on koormuste edasi kandmine/jäigastamine

Veeauru osarõhk - Õhus oleva veeauru poolt tekitatav rõhk. Temperatuuri tõustes kasvab maksimaalne võimalik veeauru osarõhk õhus

Õhu veeauru sisaldus - Õhus oleva veeauru hulk õhu ruumala või massi kohta

Tähised

ρ_{REV}^U	siseenergia tihedus vastava ruumala kohta [J/m ³]
j_{diff}^Q	soojusenergia voog [W/m ²]
u_l	vedela vee erisiseenergia [J/kg]
j_{conv}^{ml}	konvektiivne vedela vee voog [W/m ²]
u_g	gaasi erisiseenergia [J/kg]
j_{conv}^{mg}	konvektiivne gaasivoog [kg/(s*m ²)]
h_v	veeauru entalpia [J/kg]
j_{diff}^{mv}	difusiivne veeauru voog [kg/(s*m ²)]
$h_{voc,g}$	lenduvate orgaaniliste ühendite entalpia [J/kg]
$j_{diff}^{mvoc,g}$	difusiivne lenduvate orgaaniliste ühendite voog [W/m ²]
σ_{REV}^U	energia suurenemine/vähennemine antud ruumala kohta [W/m ³]
λ	materjali soojuserijuhtivus [W/(m*K)]
T	Temperatuur [K]
t	temperatuur [C]
RH	suhteline niiskus [%]
Q	õhuvoolu hulk [l/min]
$\rho_{REV}^{m_{w+v}}$	niiskuse (vesi+veeaur) tihedus antud ruumalas [kg/m ³]
j_{conv}^{mw}	konvektiivne kapillaarne vedela vee voog [kg/(s*m ²)]
j_{conv}^{mv}	konvektiivne veeauru voog [kg/(s*m ²)]
$\sigma_{REV}^{m_{w+v}}$	niiskuslisa/kadu vastava ruumala kohta [kg/(s*m ³)]
$c_l^{m_w}$	veemassi kontsentratsioon vedelas olekus [kg/kg]
$c_l^{m_{voc}}$	lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon vedelas olekus [kg/kg]
j_{conv}^{ml}	konvektiivne vedela faasi voog [kg/(s*m ²)]
K_l	veejuhtivus [s]
p_l	veerõhk [Pa]
ρ_l	vedela faasi sisemine tihedus [kg/m ³]
g	gravitatsioonikonstant [m/s ²]
$c_g^{m_v}$	veeauru massi kontsentratsioon gaasilises faasis [kg/kg]
p_v	veeauru osarõhk [Pa]
p_a	atmosfääri rõhk [Pa]
R_a	universaalne gaasikonstant [J/(kg*K)]
R_v	veeauru gaasikonstant [J/(kg*K)]
j_{conv}^{mg}	konvektiivne gaasivoog [kg/(s*m ²)]
$D_{v,air}(T)$	seisva õhu veeauruerijuhtivus [m ² /s]
μ	difusioonitakistustegur [-]
$f(\theta_g)$	funktsioon gaasi mahust ruumala ühikus [m ³ /m ³]
θ_{por}	materjali poorsus [m ³ /m ³]

θ_l -	vee maht ruumalaühikus [m^3/m^3]
$\rho_{REV}^{m_a}$ -	õhumassi tihedus vastavas ruumalas [kg/m^3]
$\sigma_{REV}^{m_a}$ -	õhu allikad/kaod vastavas ruumalas [$\text{kg}/\text{s}*\text{m}^3$]
$j_{conv}^{m_a}$ -	konvektiivne õhumassi voog [$\text{kg}/\text{s}*\text{m}^2$]
$c_g^{m_a}$ -	õhumassi kontsentratsioon gaasis [kg/kg]
$j_{conv}^{m_g}$ -	gaasi konvektiivne voog [$\text{kg}/\text{s}*\text{m}^2$]
K_g -	materjali gaasiläbivus [s]
p_g -	gaasirõhk [Pa]
ρ_g -	gaasi tegelik tihedus [kg/kg]
W_{Vapour} -	veeauru sisaldus õhus [kg/kg]
ρ_{air} -	õhu tihedus [kg/m^3]
H_{Moistair} -	Niiske õhu kogentalpia [kJ/kg]
$P_{\text{Airheating}}$ -	Õhu soojendamiseks nõutav küttevõimsus [kW]
E_{Heat} -	Õhu kütmiseks nõutav energia [kW*h]

1 SISSEJUHATUS

1.1 Taust

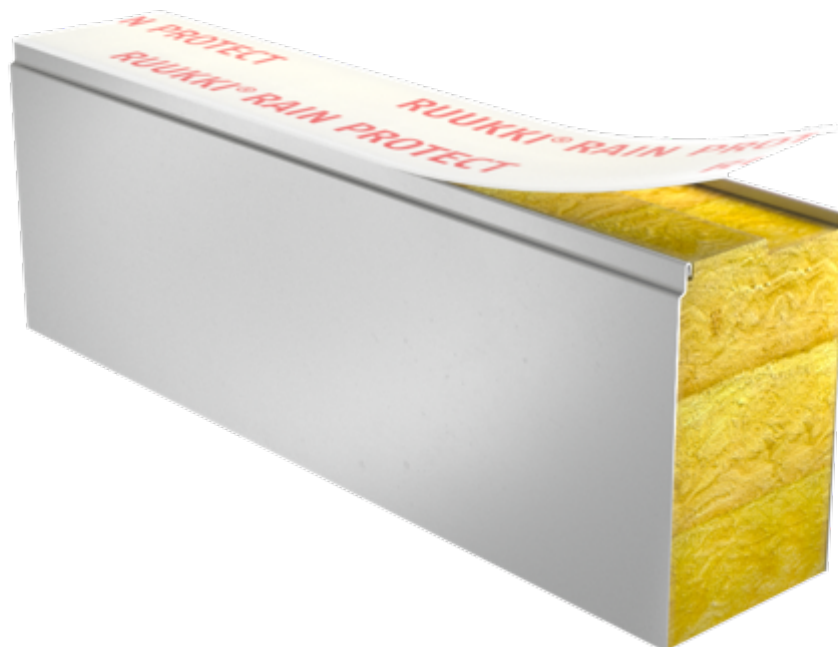
2020 aastal läbi viidud sändvitšpaneelide kuivamise uuringu esimeses etapis selgus, et niiskunud kivivilla naturaalsel teel väljakuivamine sändvitšpaneelist on aeganõudev protsess. Sellist aega reaalses ehituses aga võtta ei ole. Kuna igasugune kõrge suhtelise niiskuse või kondensaadi teke on ebasoovitav, siis tuleb leida alternatiivne kuivatamise meetod. Selleks meetodiks on kuivatamine konvektsiooni ehk õhu läbijuhtimise teel. Käesolev töö uurib kivivillaga täidetud sändvitšpaneelide konvektiivset kuivatamist erinevate välistingimuste ja õhuvoolude korral.

Talvehooaja madal temperatuur toob endaga kaasa absoluutselt kuivema välisõhu, mida on hea ära kasutada märgunud seinu kuivatamiseks. Samas lukustab madal välistemperatuur paneelis oleva niiskuse külma pinna lähedale vedelasse faasi ning kuivamispotentsiaal on väiksem kui sooja välistemperatuuriga ventileerides, mis muudab kuivatusperioodi vastuvõetamatult pikaks. Lahendus paneeli sisese veeauru osarõhu tõstmiseks talvel on soojendada sisse tõmmatavat õhku. See toob endaga kaasa täiendava energiakulu õhu soojendamiseks. Lisaks suureneb ka nõutav õhuvool testseina kuivatamiseks kuna sisse tõmmatava õhu soojus peab läbima seinu pikkuse ilma oluliselt jäheneda. Vastasel korral tekiks välja tõmmatava õhu poolses otsas jahedam ala mis soosib niiskuse vedelasse faasi liikumist. Suurem õhuvool läbi seinu suurendab omakorda energiakulu õhu kütmiseks. Alternatiivne meetod suvehooaja jaoks on kasutada ära suveõhus olevat soojust ning vähendada õhu niiskussisaldust läbi kompressori. Õhu kokku surumisel väheneb sellesse mahtuva niiskuse kogus ning seeläbi on võimalik suurendada niiskunud tarindi kuivamispotentsiaali. Suvine kuivatamine on oma iseloomu poolest energiasäästlikum kuna ei vaja õhu kütmist ega suurt õhuvoolu hulka. Talvine kuivatus võiks olla pigem varuvariant olukorras, kus primaarse tähtsusega on saada sein võimalikult kiiresti kuivaks ja mitte jääda soojemaid perioode ootama.

1.2 Plekk-soojustus-plekk tüüpi kihtpaneelidest

Kivivillaga täidetud sändvitšpaneelid on tänapäeval laialt levinud lahendus seinakonstruktsioonides, kus koormuste ülekandmine toimub post-tala karkassi abil. Monteeritavad paneelid võimaldavad kokku hoida tööaega ehitusplatsil ning suurendada ehitustäpsust. Üheks paneelides kasutatavaks soojustusmaterjaliks on mineraalvill, mille poorne struktuur võimaldab niiskuse liikumist ja kogunemist.

Paneelitootja juhiste järgi tuleb paneelide peal olev kaitsekile eemaldada vahetult peale paneeli monteerimist, et hoida paneel kuivana [1] (vt *Joonis 1.1*).



Joonis 1.1 Sändvitšpaneeli vihma eest kaitsev kile (Ruukki Oy, 2017)

Siiski esineb näiteid (vt *Joonis 1.2*), kus kaitsekile puudub või see eemaldatakse varem ning olenevalt keskkonnast ja hoiustamise ajast mineraalvill niiskub. Teiseks villa niiskumise võimaluseks on vihmane periood montaaži ajal. Paneelide kinnitamisel karkassi külge jääb kahe paneeli vahele ca 30 mm laiune vertikaalvuuk, mis täidetakse mineraalvillaga ja vastavalt tootja juhistele suletakse (veeauru läbilaskva) teibiga. Juhul kui paneelid on montaaži ajal oluliselt märgunud ning seejärel teibiga suletud toimub kuivamine aeglaselt. *Eelmise aasta uuringust (H. Piikov) ilmnes, et veeauru läbilaskev teip on samuti oluline lisatakistus kuivamisprotsessis [2].*



Joonis 1.2 Näide ehitusobjekti laoplatsilt, kus sändvitšpaneelides olev kivivill on avatud keskkonnale ning on märgumise oht (Kalamees)

Lisaks sellele, et niiske mineraalvilla soojuslähivus on suurem, kondenseerub paneeli lõksu jäänud niiskus külmema pinna lähedale ning villa ja pleki vaheline PU liim nõrgestub aja vältel [3] [4]. Võivad tekkida "mullid fassaadi pinnal".

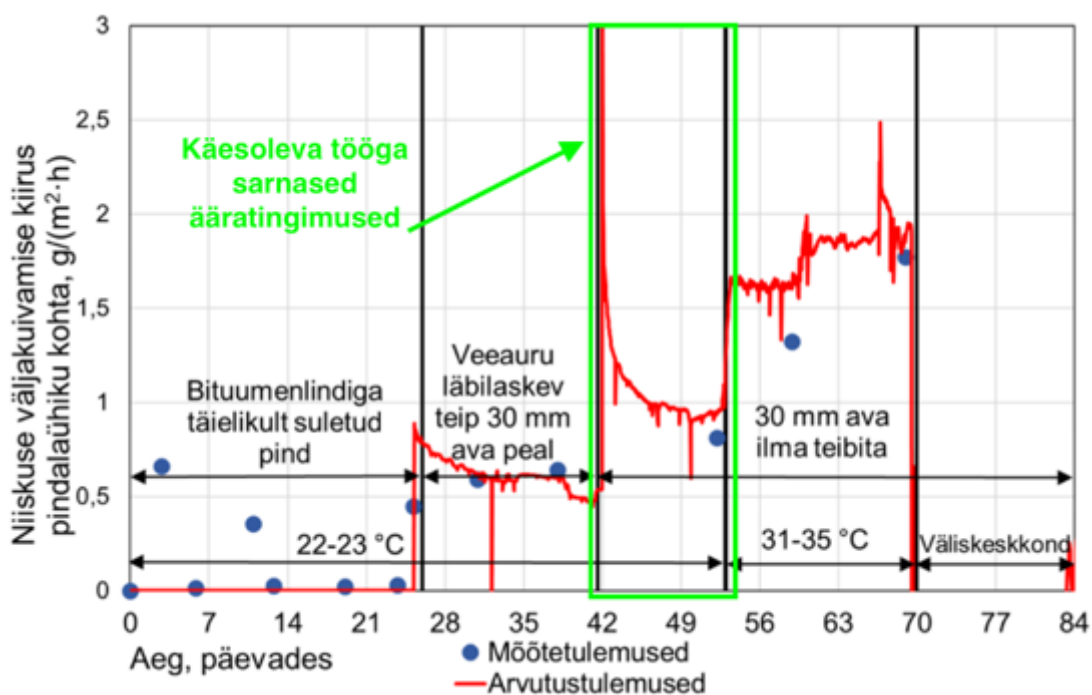
Uuring paneelide kuivamisest difusiooni teel näitas, et villa kuivamiseks on vaja ideaalseid ilmastikuolusid ja aega [2], mida tavaliselt ehituses napib. Seega võiks olla lahendus paneelide olukorra kiiremaks parandamiseks konvektiivne kuivatamine õhu läbijuhtimisega.

1.3 Uuringu eesmärk

Käesoleva uurimistöö eesmärk on leida lahendus plekk-mineraalvill-plekk tüüpi kihtpaneelide kuivatamiseks montaažijärgselt. Selle saavutamiseks täidetavad eesmärgid:

- Katsete abil kuivatuse potentsiaali mõõtmine muutuva temperatuurikeskkonna katses
- Kalibreerida mõõtetulemuste alusel simulatsioonimudel arvutustarkvaras Delphin 5.9
- Leida optimaalne õhuvooluhulk/period paneelide kuivatamiseks

Käesolev töö on jaotatud kolme suuremasse peatükki. Meetodite peatükk kirjeldab katse läbi viimiseks teostatud tegevusi, selleks kasutatavaid vahendeid ja seadmeid, katse jäljendamiseks kasutatavat arvutusmetoodikat ning arvutusmudeli koostamiseks tarvilikke andmeid ja nende mõõtmist. Tulemuste ja nende hindamise peatükis on käsitletud õhuvooluhulga valikut katsele, katses saadud mõõtetulemusi ning nende ühtivust arvutustulemustega ning eelmise etapi uuringuga (vt *Joonis 1.3*) kuivatusstrateegiaid suve- ja talve perioodil. Lisaks on võrreldud kuivamist statsionaarsete ja dünaamiliste ääritingimustega mõlema kuivatusmeetodi korral. Tulemuste hindamise peatükis on võetud kokku eelpool saadud tulemused. Lisade all on toodud kõik töö põhiosast välja jäänud mõõtetulemused.



Joonis 1.3 H. Piikovi poolt uuringu esimeses etapis välja toodud [2] niiskumassi vähenemine pinnaühiku kohta ajas, teise etapi katsega sarnaste ääritingimuste puhul

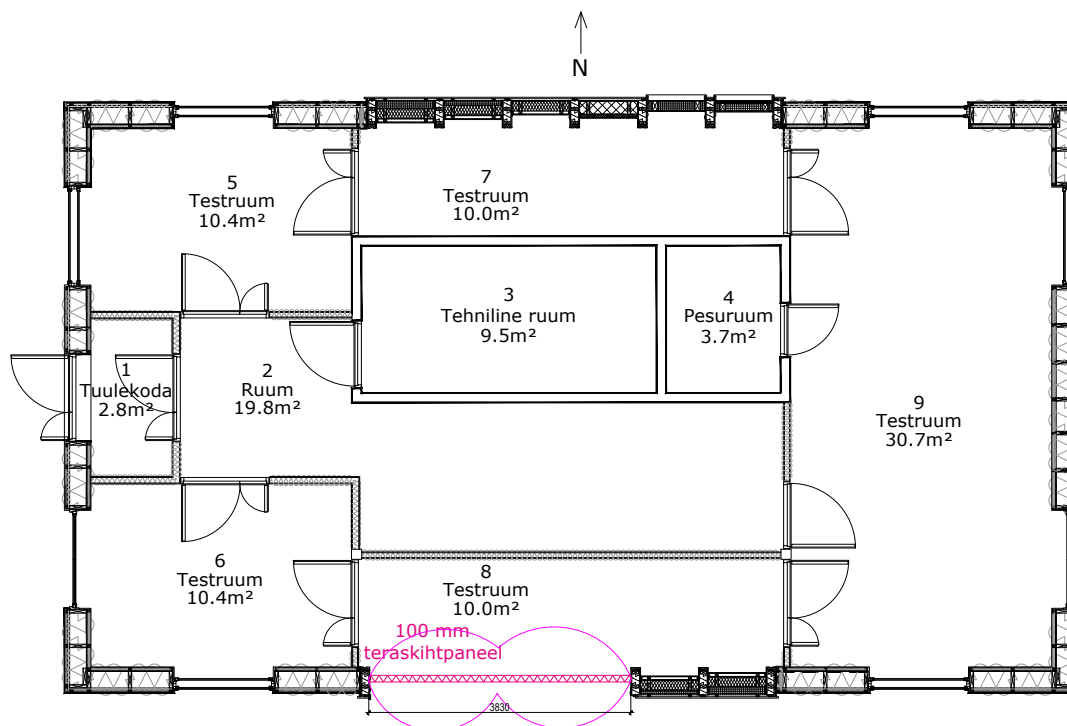
2 MEETODID

2.1 Mõõtmised

2.1.1 Katse keskkond

Antud uurimistöö läbiviimisel kasutati kahte tüüpi sändvitš-paneele:

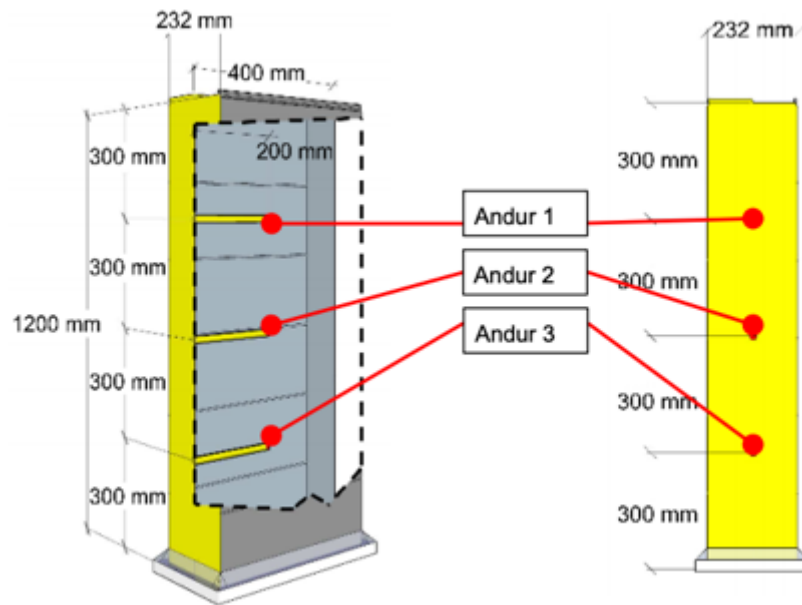
- Püsiva temperatuurikeskkonna katses kasutati samu 1200x400x230 mm katsekehi (vt *Joonis 2.2*), mida kasutati H. Piikovi magistritöös "KIVIVILLAGA SÄNDVITŠ-PANEELIST KERGSEINTE NIISKUSTEHNILISE TOIMIVUSE HINDAMINE". Katse läbiviimiseks valiti Taltechi testmaja lõunapoolne testruum nr 8 (vt *Joonis 2.1*) Taltechi Mäepealse 3 asuvas liginullenergia testmajas. Mõõteperioodi vältel hoiti katsekehade ümbruses temperatuuri +23°C ja RH 30%. Katsekehasid kaaluti kuivamise ajal. Katsekehades on temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurid kolmes punktis (vt *Joonis 2.3*)
- Muutuva temperatuurikeskkonna katses kasutatavad sändvitšpaneelid asendatati olemasoleva testseinaga Taltechi testmaja lõunapoolses ruumis nr 8 (vt *Joonis 2.1*). Muutuva temperatuurikeskkonna katses kasutatavate paneelide mõõtmed on 3640x600x100 mm (vt *Joonis 2.4*) ning testruumi 8 sisetemperatuur +23°C suhteline niiskus 60%. Väliskeskkonna temperatuuri ja suhtelist niiskust mõõdeti anduritega ja salvestatakse loggeritega. Muutuva temperatuurikeskkonna katses toimub konvektsioon välisõhuga.



Joonis 2.1 Testmajas valitud katseseina asukoht



Joonis 2.2 Püsiva temperatuurikeskkonna katses kasutatavad katsekehad



Joonis 2.3 Temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite paigutus püsiva temperatuurikeskkonna katse katsekehades (Kalbe et al., 2020)



Joonis 2.4 Muutuva temperatuurikeskkonna katses kasutatavad katsekehad (vt testseina ehitus Graafilise lisa joonis 1). Kovneksioon välisseinakatses välisõhuga.

Katses kasutatava õhuvooluhulga valikuks kasutati hooajale keskmistatud väliskliima tingimusi 1995-1996 kondensaadi testaasta andmetest [5] (vt Tabel 2.5).

Hooaeg	Hooajale keskmistatud temperatuur (°C)	Hooajale keskmistatud suhteline niiskus %
Talv	-4.4	93
Kevad	4.3	70
Suvi	14.5	75
Sügis	5.2	91

Tabel 2.5 Hooajale keskmistatud väliskliima tingimused kondensaadi testaastast

2.1.2 Seadmed

Katseandmete salvestamiseks puuriti katsekehadesse, mineraal villa sisse, augud ning paigaldatakse tühimikesse andurid. Püsiva temperatuurikeskkonna katse puhul mõõdetakse temperatuuri ja suhtelist niiskust katsekeha punktides ja katsekeha ümbruses loggeritega Hobo UX100-023 (temperatuuri mõõteulatus -20°C kuni $+70^{\circ}\text{C}$, mõõtetäpsus $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$ ja suhtelise niiskuse mõõteulatus 1% kuni 100%, mõõtetäpsus 10% ja 90% vahel $\pm 2,5\%$ ning väljaspool neid piire $\pm 5\%$). Lisaks teostatakse kaalumised seadmega KERN FKB 65K1A (Mõõteulatus kuni 65 kg, mõõtetäpsus 1g). Muutuva temperatuurikeskkonna katses kasutatavad loggerid temperatuuri ja suhtelise niiskuse salvestamiseks on Omnisense 64K, mille külge ühedatakse mõõtmiseks A-1 Humisense andurid (temperatuuri mõõteulatus -40°C kuni $+120^{\circ}\text{C}$, mõõtetäpsus $10-55^{\circ}\text{C}$ vahel $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, mõõteulatuse piiril kuni $\pm 1,9^{\circ}\text{C}$ ning suhtelise niiskuse mõõteulatus 1% kuni 100%, mõõtetäpsus $\pm 2\%$ ja 100% juures maksimaalselt $\pm 3,5\%$). Õhurõhu jaotuse tuvastamiseks katses kasutati õhurõhu sensoreid Dwyer Magnesense (rõhu mõõteulatus 1-250 Pa, mõõtetäpsus $\pm 1\%$). Paneeli läbivat õhuvooluhulka mõõdeti püsiva temperatuurikeskkonna katse puhul seadmega SMC PFM 710 (õhuvooluhulga vahemik 0,2-10 l/min; minimaalne mõõtühik 0,01 l/min; korratavus $\pm 1\%$). Muutuva temperatuurikeskkonna katse puhul kasutati õhuvooluhulga mõõtmiseks seadet SMC PFM 725 (õhuvooluhulga vahemik 0,5-25 l/min; minimaalne mõõtühik 0,1 l/min; korratavus $\pm 1\%$). Õhuvoolu tekitamiseks kasutati Elmo Rietschle vaakumpumpa, mille külge ühendatud sagedusmuundur võimaldas reguleerida imemisvõimsust.

2.1.3 Testseina ehitamine ja käivitamine

Testseina ehitamiseks oli tarvis esmalt demonteerida eelnevad katseseinad ning eemaldada neist temperatuuri ja RH andurid, mida kasutada käesolevas katses. Eelnevad katseseinad saeti karkassi küljest lahti ning transportiti kõrvalasuva labori keldrisse, kus katseseinad avati ning eemaldati t° ja RH logerid.

Katse jaoks vabastatud ava suleti vahtpolüstüreeniga ning kaeti seest poolt PE killega kuniks käesolevas katses kasutatavad paneelid saabusid. Katses kasutatavad paneelid on Ruukki 100 mm paksused ja 3640 mm pikkused kivivilla täidisega sändvitšpaneelid. Testsein koosneb kolmest paneelist, mis on välja lõigatud Ruukki standardkõrgusega (1200 mm) üksteise peale tappliitega monteeritavatest paneelidest. Sändvitšpaneelide saabumisel puuriti paneeli mineraalvilla sisse avad andurite jaoks, risti soojusvooga ning paigaldati need puuritud avadesse (vt *Joonis 2.6*).



Joonis 2.6 Risti soojusvooga puuritud avadesse sisestatud andurid

Seejärel monteeriti detailidest kokku testseina osad (vt

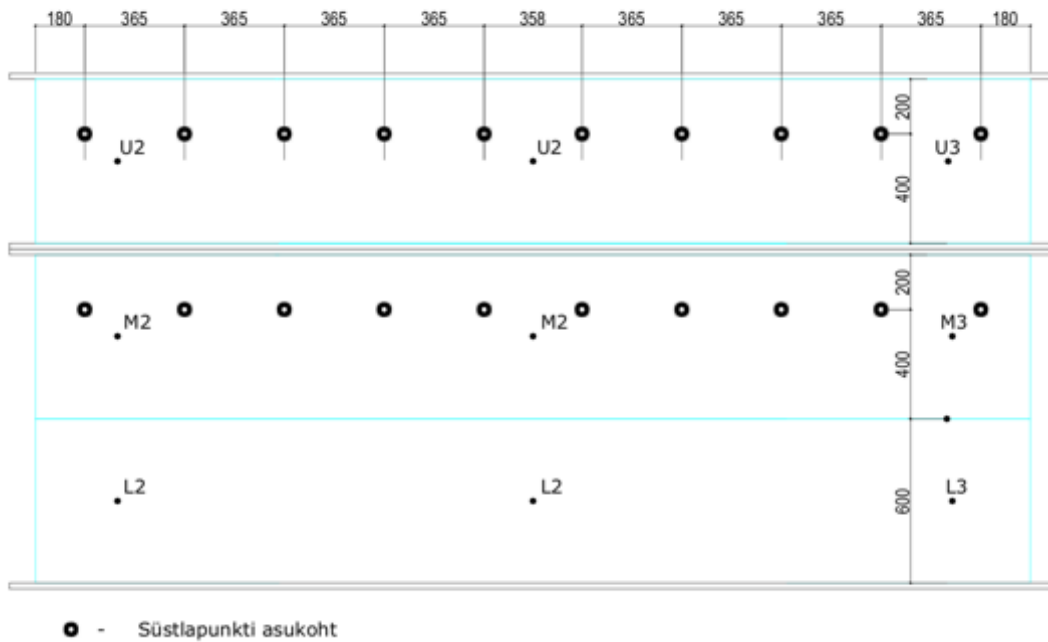
Joonis 2.7) (vastavalt Graafilise Lisa joonisele 1). Eemaldati ajutine vahtpolüstüreen ning paigaldati testsein selle asemele. Õhutiheduse tagamiseks tihendati bituumen-alumiinium teibi servad sanitaarsilikooniga ning süstiti vesi seina (vt *Joonis 2.8*). Seina

süstitav veekogus on arvestatud 2016 aasta Paldiski seirejaama augustikuu keskmise vihma järgi, R. Uus magistritöö alusel [6]. Sademekogus 100 mm kuus on jagatud augustikuu päevade arvuga ning korrutatud paneeli horisontaallõike pinnaga 0,364 m². Seega iga standardkõrgusega paneeli kohta lisatakse 1170 ml vett, mis vastab 24 tunni jooksul otse paneeli ülapinnast sisse sadanud keskmisele augustikuu vihmale. Süstlaaugud tihendati bituumen-alumiinium teibiga, mille servad tihendati sanitaarsilikooniga õhulekke vähendamiseks. Katse alustamiseks avati 100 mm laiune mineraalvilla pind paneelide otstes, mis imiteerib tegelikku täitmata vertikaalvuuki ning käivitati ventileeritava katsekeha (koosneb P2 ja P3 paneelist) pump. Paneel P1 on teistest paneelidest õhutihedalt eraldatud ning kuivas ainult difusiooni teel.



Joonis 2.7 Detailidest kokku monteeritud katsekeha, mida kuivatatakse seinamoniteeritult konvektsiooni teel

Vaade seinale välisruumist



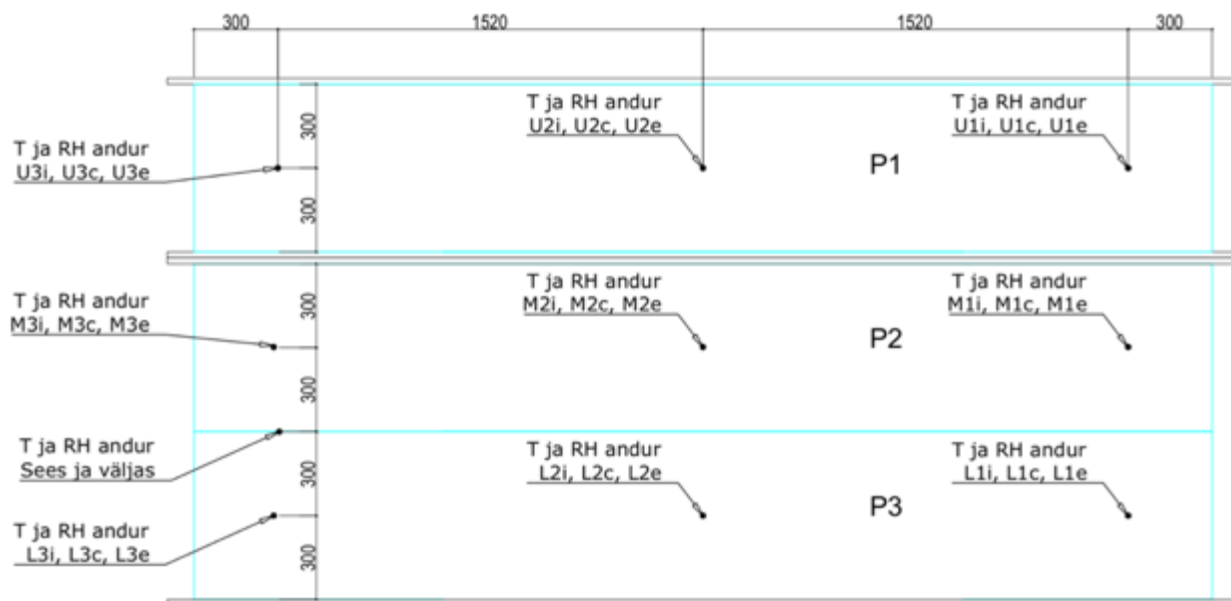
Joonis 2.8 Vee sisestamiseks tehtud süstlaavade asetus testseinas. Seinä ülemisse osasse sisestati iga ava kaudu 50 ml ja alumisse osasse 100 ml vett

- **Ettevalmistus testseina püstitamiseks**

Testhoone hoovis ladustatud testseina osad "P1", "P2" ja "P3" on standardmõõdus paneelist välja lõigatud 600 mm kõrgused tükid. P2 ja P3 on lõigatud ühest standardmõõdus paneelist nõnda, et P3 jääb ülemise tappliitega ning P2 alumise tappliitega. P1 on lõigatud välja standardmõõdus paneeli keskelt ilma tappliideteta. Valmis lõigatud tükid transporditi ettevalmistuseks testruumi 9 (vt *Joonis 2.1*).

Järgnevalt puuriti villa sisse avad temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite jaoks ning paigaldati need avadesse (vt andurite asukohta *Joonis 2.9* ja Graafilise Lisa joonis 1). Seejärel valmistati ette plekkdetailid paneeli otstes, lõigati välja vajaliku mõõduga PIR plaadid ning liimiti need mastiksiga plekkdetailide sisse (vt *Joonis 2.10* ja Graafilise Lisa joonis 1, DET-1). Plekkdetailidesse puuriti 1/8 tolli suurused augud ja paigaldati üleminekuliitmikud hilisemaks õhuvoolu seadme kinnituseks (vt *Joonis 2.11*). Lõigati veekindlast vineerplaadist välja paneele eraldavad tükid (vt joonis 2.22 lõige 2-2). Sirge lõike tagamiseks kasutati juhtsiinil ketassaagi.

Vaade seinale siseruumist



Joonis 2.9 Temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite paigutus testseinas



Joonis 2.10 Plekkdetailid konvektsiooni teel kuivatatava seinosa otstes (vt Graafilise lisa joonis 1, DET-1)



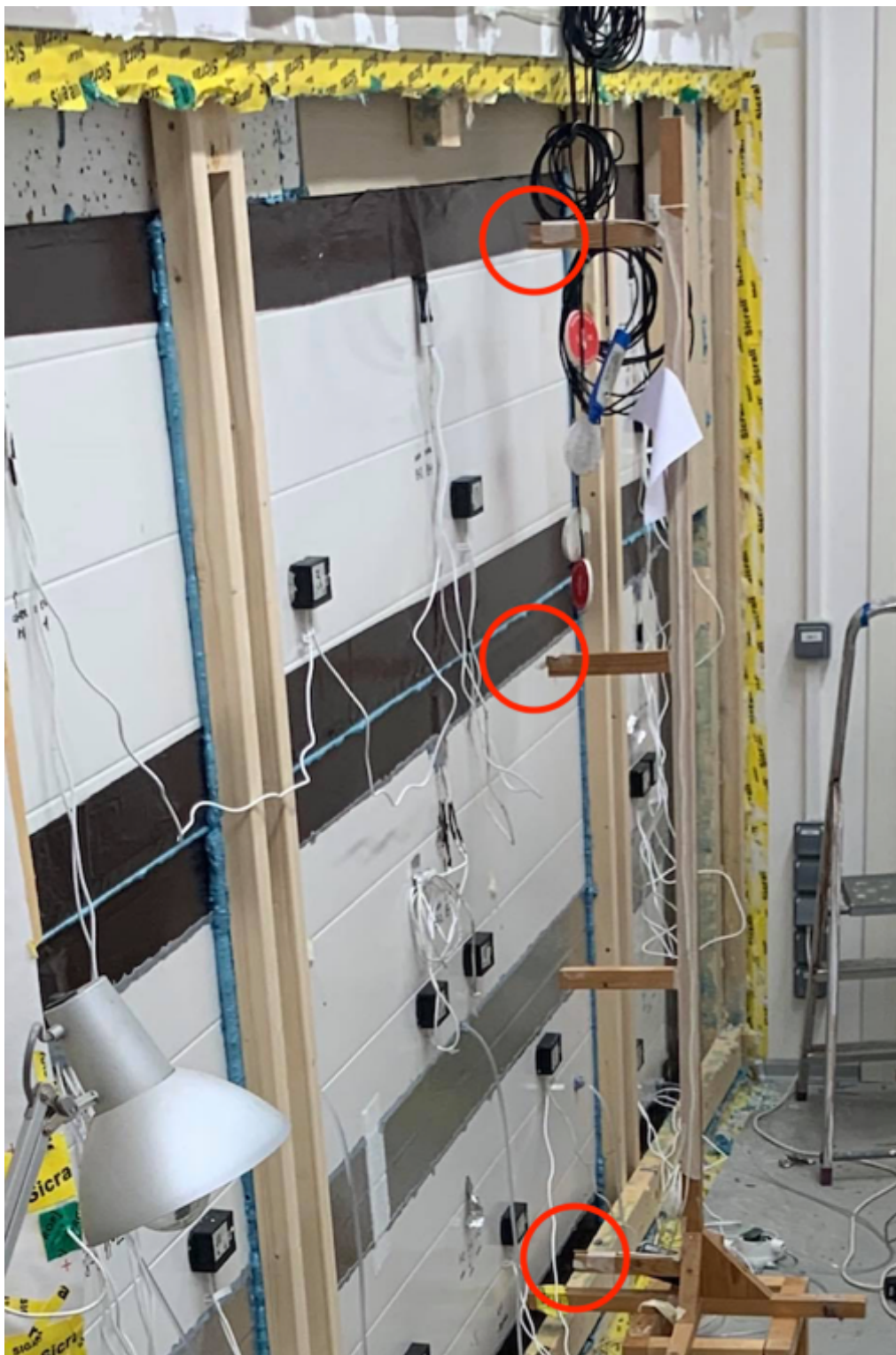
Joonis 2.11 Üleminekuliitmik läbi plekkdetaili õhuvoolu mõõteseadme ühendamiseks sein külge

Järgnevalt asetati maha 3830 x 300 mm bituumen-alumiinium teip, mille keskele asetati veekindel vineer 3830 x 100 mm. Vineeri peale tõsteti ette valmistatud paneel P3 ning selle otsa tappliitega paneel P2. Ühendatud paneelide otstesse paigaldati ettevalmistatud plekkdetailid ning kinnitati plekkdetailid paneeli külge alumiiniumist neetidega läbimõõduga 3,2 mm sammuga 50 mm. Maha asetatud bituumen-alumiinium teip volditi paneeli külgedele mõlemale poole 100 mm ulatuses. Neediavad tihendati bituumen-alumiinium teibiga. Seejärel asetatati P2 peale samas mõõdus veekindel vineer ning kaeti pealtpoolt bituumen-alumiinium teibiga (vt *Joonis 2.12*), mis pöörati mõlemale paneeli küljele 100 mm ulatuses. Sellega on ventileeritav testsein valmis sein monteerimiseks. Montaažijärgselt katsetati õhuvoolu läbi sein. Õhutiheduse tagamiseks eemaldati kruviavad ning tihendati bituumen-alumiinium teibi servad sanitaarsilikooniga. Sarnaselt valmistati ette difusiooni teel kuivav katsekeha kuid ilma otsaplekkideta.



Joonis 2.12 Bituumen-alumiinium teibi kleepimine vineeri peale ja paneeli külgedele.

Arvutusmudeli ääritingimuste määramiseks mõõdeti keskkonnatemperatuuri ja suhtelist niiskust ruumis sees sisepinna lähedal (vt *Joonis 2.13*) ning väliskeskkonnas päikese eest varjestatud õhu liikumisele avatud karbis testseina vahetus läheduses (vt *Joonis 2.14*).



Joonis 2.13 Temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite asukohad sisetingsimuste mõõtmiseks.



Joonis 2.14 Temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurite asukoht välistingimuste mõõtmiseks.

- **Katse käik**

Katse algas 18. mail, millal süstiti katsekehadesse vesi. Vee sisestamiseks puuriti mõlemasse katsekehasse välispinda 10 ava läbimõõduga 3 mm (vt *Joonis 2.9*) (ka süstla pea välisläbimõõt 3 mm, mis välistab vee põgenemise ava ja süstla pea vahelt), süstiti vesi aukudesse ning kaeti need bituumen-alumiinium teibiga, teibi servad kaeti sanitaarsilikooniga õhulekke vältimiseks. Punktides, kus ületatakse hügrokoopse ala ülempiir toimub vee intensiivne adsorbeerumine villakiududele. Kui oletada, et teoreetiliselt oli sein terve talve ees ning seest märg, siis kujuneb külma perioodi jooksul välja olukord, kus enamuse seinas olevast veest on adsorbeerunud villakiududele välispinna lähedal. Süstimise kiirus oli ca 50 ml 10 sekundi kohta, et suurem osa vett satuks välispinna lähedale. Niiskuse ühtlustumine paneelis toimus 28. maini ehk 10 päeva vältel. Järgnevalt avati difusiooni teel kuivava testseina külgpinnad ning käivitati pump konvektsiooni teel kuivava katsekeha ventileerimiseks kuni 18. juunini. Õhuvool läbi seina katkestati iga päev 1-2 tunniks, et jahutada pumpa. Lisaks oli kaks suuremat õhuvoolu katkestust- 3. juuni esimesed 12 tundi ning 7. juuni esimesest tunnist 156 tundi. Viimati mainitud õhuvoolu paus algas ajal, mil õhu väljatõmbeava juures oleva anduri M3e (vt *Joonis 2.13*) suhteline niiskus langes esmakordselt alla 97% ning kolme päeva kestel langes kuni 80% peale. 156 tundi kestnud pausi vältel tõusis suhteline niiskus punktis M3e languseelsele tasemele. Märkimisväärset ööpäevase keskmise temperatuuri langust pausi ajal ei esinenud. Selline suhtelise niiskuse tõus väljatõmbeava lähedal asuvas mõõtepunktis viitab vedela vee kogunemisele mõõtepunktide eemal ning selle hilisemale ümberjagunemisele ajal, mil õhuvool on peatatud. 14. juuni keskpäeval käivitati taas õhuvool läbi seina ning veeauru osarõhud ja suhteline niiskus mõõtepunktides langesid. Õhuvool peatati 18. juuni kell 23:59 ning veeauru osarõhu päevane aritmeetiline keskvärtus on sellest ajast püsinud stabiilne ning madalam kui difusiooni teel kuivava katsekeha näidud (vt *Joonis 3.23*).

2.2 Arvutused

2.2.1 Arvutustarkvara Delphin 5.9

Testseina arvutusmudel on koostatud tarkvaras Delphin 5.9, mille loojateks on Dresdeni Tehnikaülikooli ehitusklimatoloogia instituudi teadlased John Grunewald, Andreas Nicolai ja Heiko Fechner. Programmis on võimalik jagada mudeldatud materjali lõplikeks elementideks, millele rakendatakse rakendatakse CHAMPS arvutusmudelit (coupled heat, air, moisture, pollutant simulation), mis tõlgituna tähendab sidestatud soojuse, õhu, niiskuse, saasteaine simulatsiooni. Simulatsioonis kasutatakse osatuletistega tasakaaluvõrrandeid, mis kirjeldavad soojuse, niiskuse ja õhu liikumist lõplike elementide vahel sõltuvalt ajast [7]. kuna antud töös saasteaine liikumist ei käsitleta, siis vaatleme ainult soojusenergia, niiskusmassi ja õhumassi tasakaalu võrrandeid.

- **Siseenergia tasakaal**

Eeldused: - Kõikide faaside vahel esineb temperatuuri tasakaal
- Siseenergia U ja entalpia H erinevus on piisavalt tühine hülgamiseks

Vastavalt loetletud eeldustele avaldub siseenergia tasakaal valemi 2.1 kujul:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = -\frac{\partial}{\partial x} * [j_{diff}^Q + u_l * j_{conv}^{ml} + u_g * j_{conv}^{mg} + h_v * j_{diff}^{mv} + h_{voc,g} * j_{diff}^{mvoc,g}] + \sigma_{REV}^U \quad (V2.1)$$

Kus

ρ_{REV}^U - siseenergia tihedus vastava ruumala kohta [J/m³]

j_{diff}^Q - soojusenergia voog [W/m²]

u_l - vedela vee erisiseenergia [J/kg]

j_{conv}^{ml} - konvektiivne vedela vee voog [W/m²]

u_g - gaasi erisiseenergia [J/kg]

j_{conv}^{mg} - konvektiivne gaasivoog [kg/(s*m²)]

h_v - veeauru entalpia [J/kg]

j_{diff}^{mv} - difusiivne veeauru voog [kg/(s*m²)]

$h_{voc,g}$ - lenduvate orgaaniliste ühendite entalpia [J/kg]

$j_{diff}^{mvoc,g}$ - difusiivne lenduvate orgaaniliste ühendite voog [W/m²]

σ_{REV}^U - energia suurenemine/vähennemine antud ruumala kohta [W/m³]

$$j_{diff}^Q = -\lambda * \frac{\partial T}{\partial x} \quad (V2.2)$$

Kus

λ - materjali soojuserijuhtivus [W/(m*K)]

T - Temperatuur [K]

- **Niiskusmassi tasakaal**

- Eeldused:**
- Jää teke on välistatud
 - Kehtib Kelvini võrrand poorirõhu ja suhtelise niiskuse kohta
 - Tahkete materjalide deformatsioonid on hüljatavalt väikesed
 - Vedela vee difusioon, ja faaside vaheline rõhuerinevus hüljatav
 - Kõikide faaside vahel esineb rõhuline tasakaal

Vastavalt loetletud eeldustele avaldub niiskusmassi tasakaal valemi 2.3 kujul:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_w+v} = -\frac{\partial}{\partial x} * [j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}] + \sigma_{REV}^{m_w+v} \quad (V2.3)$$

Kus

$\rho_{REV}^{m_w+v}$ - niiskuse (vesi+veeaur) tihedus antud ruumalas [kg/m³]

$j_{conv}^{m_w}$ - konvektiivne kapillaarne vedela vee voog [kg/(s*m²)]

$j_{conv}^{m_v}$ - konvektiivne veeauru voog [kg/(s*m²)]

$\sigma_{REV}^{m_w+v}$ - niiskuslisa/kadu vastava ruumala kohta [kg/(s*m³)]

- **Vedela vee konvektiivne (kapillaarne) voog**

$$j_{conv}^{m_w} = c_l^{m_w} * j_{conv}^{m_l} \quad (V2.4)$$

Kus

$$c_l^{m_w} = 1 - c_l^{m_{voc}} \quad (V2.5)$$

Kus

$c_l^{m_w}$ -veemassi kontsentratsioon vedelas olekus [kg/kg]

$c_l^{m_{voc}}$ -lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsioon vedelas olekus [kg/kg]

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l * \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l * g \right] \quad (V2.6)$$

Kus

$j_{conv}^{m_l}$ - konvektiivne vedela faasi voog [kg/(s*m²)]

K_l - veejuhtivus [s]

p_l - veerõhk [Pa]

ρ_l - vedela faasi sisemine tihedus [kg/m³]

g - gravitatsioonikonstant [m/s²]

- **Veeauru konvektiivne voog**

$$j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} * j_{conv}^{m_g} \quad (V2.7)$$

Kus

$$c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a + p_v} * \frac{R_a}{R_v} \quad \text{veeauuru massi kontsentratsioon gaasilises faasis [kg/kg]}$$

$$p_v - \quad \text{veeauuru osarõhk [Pa]}$$

$$p_a - \quad \text{atmosfääri rõhk [Pa]}$$

$$R_a - \quad \text{universaalne gaasikonstant [J/(kg*K)]}$$

$$R_v - \quad \text{veeauuru gaasikonstant [J/(kg*K)]}$$

$$j_{conv}^{m_g} - \quad \text{konvektiivne gaasivoog [kg/(s*m^2)]}$$

- **Difusiivne veeauuru voog**

$$j_{diff}^{m_v} = - \frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} * f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (V2.8)$$

Kus

$$D_{v,air}(T) - \quad \text{seisva õhu veeauruerijuhtivus [m^2/s]}$$

$$\mu - \quad \text{difusioonitakistustegur [-]}$$

$$f(\theta_g) - \quad \text{funktsioon gaasi mahust ruumala ühikus [m^3/m^3]}$$

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l \quad (V2.9)$$

Kus

$$\theta_{por} - \quad \text{materjali poorsus [m^3/m^3]}$$

$$\theta_l - \quad \text{vee maht ruumalaühikus [m^3/m^3]}$$

- **Õhumassi tasakaal**

Eeldused: - Kuiv õhk koosneb O₂, N₂ ja teistest väiksema sisaldusega ühenditest kuid mitte lenduvatest orgaanilistest ühenditest ega veeaurust

- Gaasifaas koosneb kuivast õhust, veeaurust ja lenduvatest orgaanilistest ühenditest

- Gaasifaasi konvektiivset voolu käsitletakse eraldi soojuse, niiskuse ja saasteosakeste liikumisest, ehk soojuse, niiskuse ja saasteosakeste liikumisel pole õhuvoolule muud mõju kui üleslükkejõud

- Liikumise kineetiline energia on tühine ning hüljatav

- Kuiva õhu gaasikonstant kehtib ka niiske õhu korral

Vastavalt loetletud eeldustele avaldub õhumassi tasakaal valemi 2.10 kujul:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_a} = - \frac{\partial}{\partial x} [j_{conv}^{m_a}] + \sigma_{REV}^{m_a} \quad (V2.10)$$

Kus

$$\rho_{REV}^{m_a} - \quad \text{õhumassi tihedus vastavas ruumalas [kg/m^3]}$$

$$\sigma_{REV}^{m_a} - \quad \text{õhu allikad/kaod vastavas ruumalas [kg/s*m^3]}$$

$$j_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} * j_{conv}^{m_g} \quad (V2.11)$$

Kus

$$j_{conv}^{m_a} - \text{konvektiivne õhumassi voog [kg/s*m}^2\text{]}$$

$$c_g^{m_a} - \text{õhumassi kontsentratsioon gaasis [kg/kg]}$$

$$c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_a + p_v} * \frac{R_v}{R_a} \quad (V2.12)$$

Kus

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g * \left[\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g * g \right] \quad (V2.13)$$

Kus

$$j_{conv}^{m_g} - \text{gaasi konvektiivne voog [kg/s*m}^2\text{]}$$

$$K_g - \text{materjali gaasiläbivus [s]}$$

$$p_g - \text{gaasirõhk [Pa]}$$

$$p_g = p_a + p_v \quad (V2.14)$$

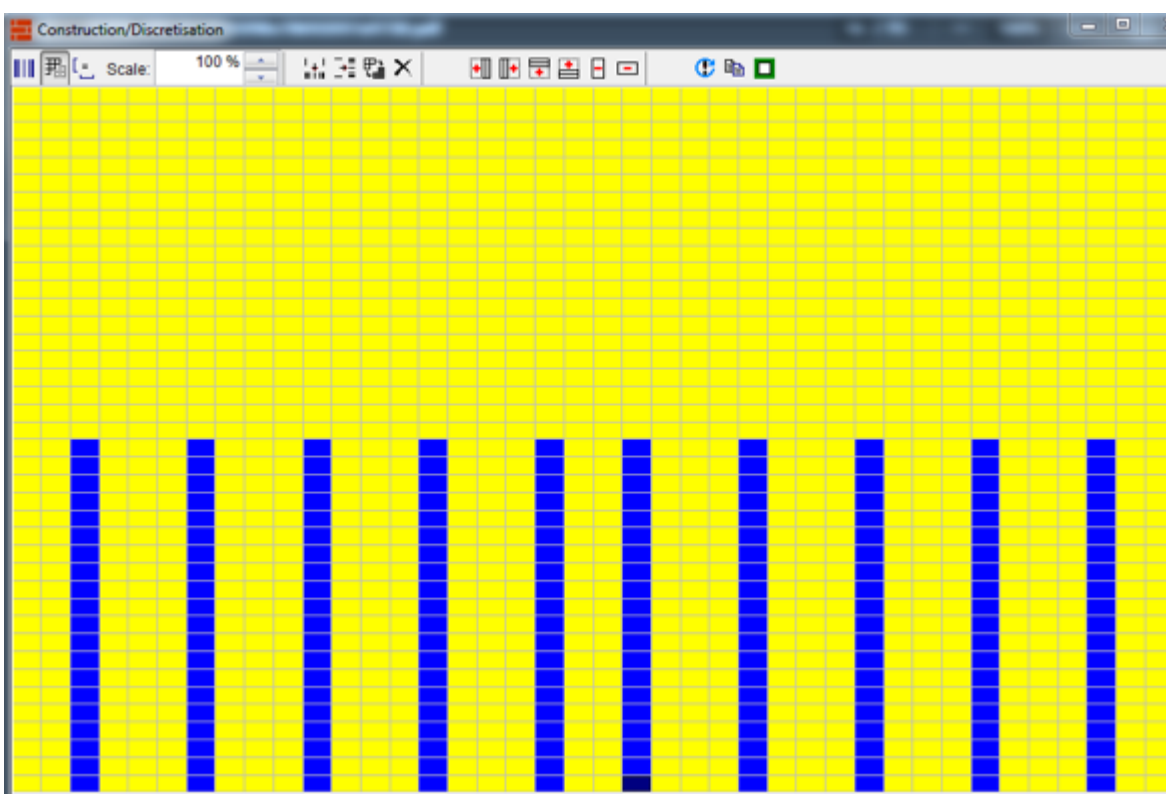
$$\rho_g = \frac{\rho_g}{T * R_a} \quad (V2.15)$$

$$\rho_g - \text{gaasi tegelik tihedus [kg/kg]}$$

2.3 Arvutusmodeli kalibreerimine katsetatud olukorrale

Arvutusmodeli vastavusse viimiseks katsetatud olukorrale on tarvilik koostada kliimafailid mõõteperioodil kogutud andmete kohta. Antud töös mõjutavad testseina kuivamist 4 keskkonnatingimust- sisetemperatuur seinä sisepinnal, välistemperatuur väliskeskkonnas, väliskeskkonna suhteline niiskus ja õhuvoolu suurus ajas (Vt *Joonis 3.16, Joonis 3.17, Joonis 3.18*

Joonis 3.19 ja Joonis 3.20). Samuti on oluline algniiskuse õige modelleerimine. Delphin 5.9 võimaldab jaotada algniiskust vaid kahes suunas kuid mitte kolmandas suunas. Seetõttu võeti arvutusmudelisse süstlapunktide asukohtades niiskuse jaotus kõrguslikult ühtlaseks (Vt *Joonis 2.15*). Esimesed 10 päeva on arvutusmudelisse ääretingimusteks vaid sise- ja välistemperatuur kuna reaalses katses toimus sel ajal niiskuse ümberjagunemine ning niiskusvahetust väliskeskkonnaga ei olnud. 11. päeva alguses lisati difusiooni teel kuivava mudeli otsapindadele ääretingimuseks difusioon mõõdetud välistemperatuuri ja suhtelise niiskuse (Vt *Joonis 3.27*). Konvektsiooni teel kuivavale mudelile lisati õhuvool ühes suunas läbi materjali ning temperatuur ja suhteline niiskus õhuvoolu lähtepunktis võeti võrdseks mõõdetud välistingimustega (vt *Joonis 3.28*).



Joonis 2.15 Pealtvaade arvutusmudelisse olevale testseina geomeetria. Algniiskus on jaotatud sinisesse alasse ühtlaselt niiskussisaldusega $0,00913 \text{ m}^3/\text{m}^3$

3 TULEMUSED JA NENDE HINDAMINE

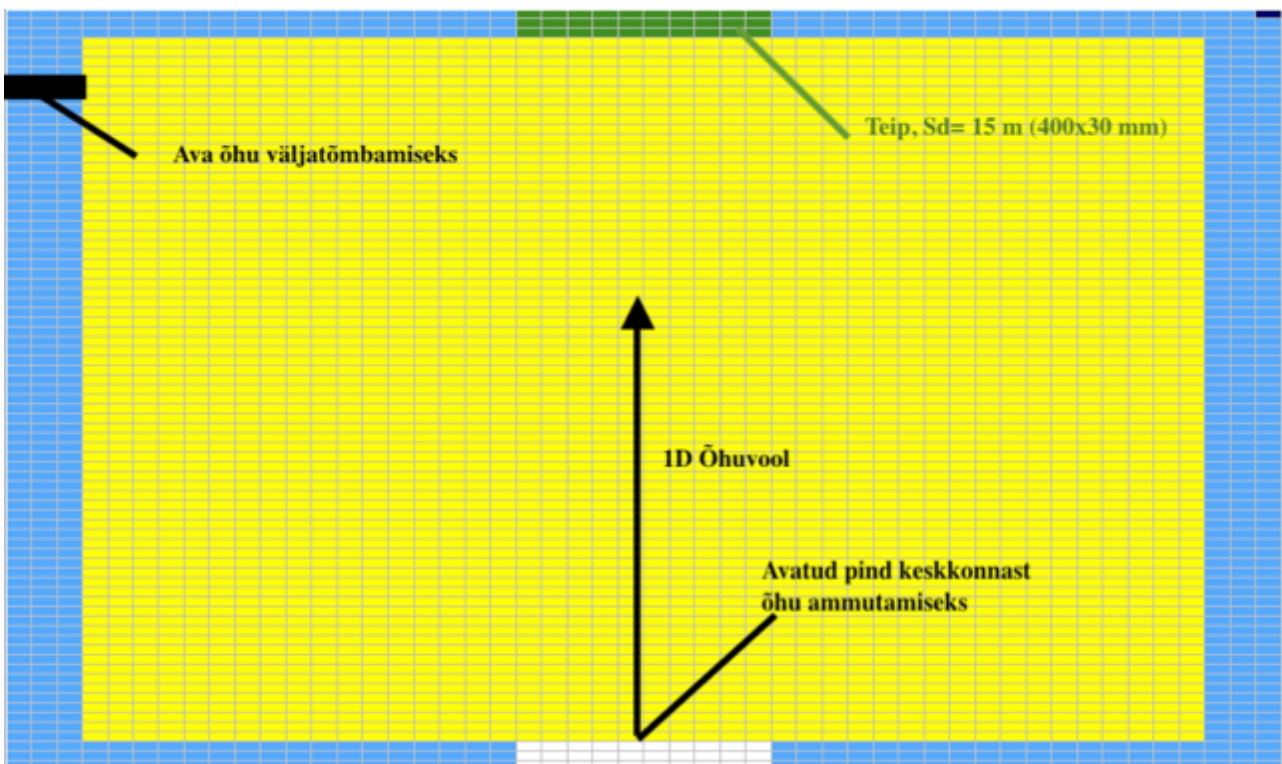
3.1 Mõõtmised

3.1.1 Õhuvooluhulga valik katsetele

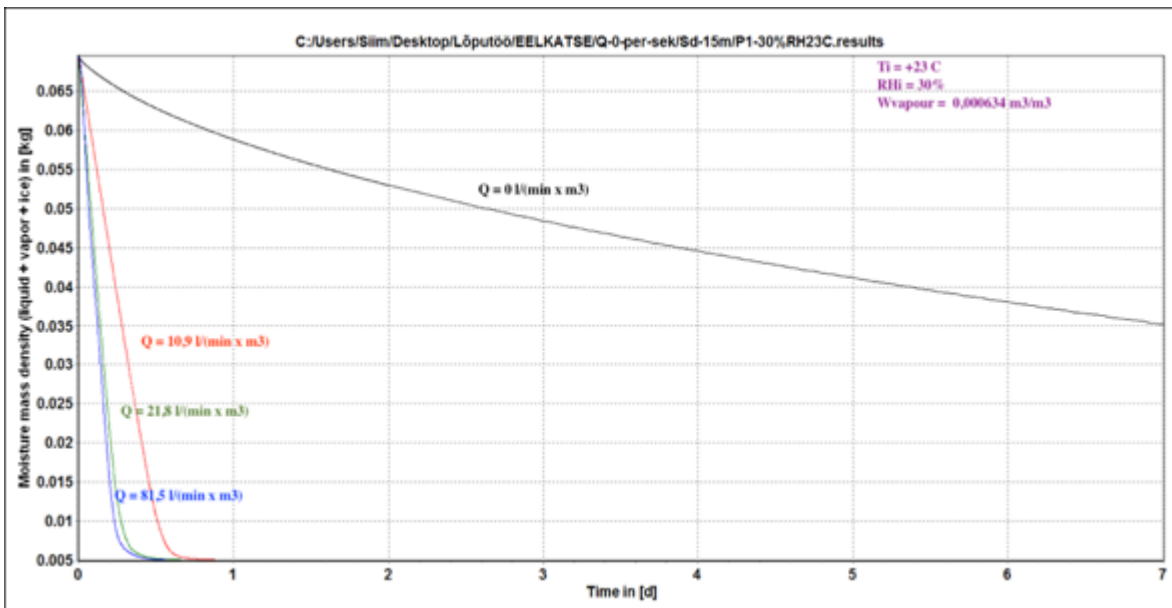
Õhuvooluhulga suurusest sõltub paneeli sisese niiskuse väljakandumise kiirus ümbritsevast keskkonnast sisse tõmmatava õhuga. Püsiva temperatuurikeskkonna katse puhul kasutatavad keskkonna tingimused on +23°C ja RH 30%. Katsekeha alumises osas on veepind ning veepinna ja villa vahel on õhuvähe. Paneeli sisese pooriõhu suhteline niiskus katse alguses on 97-100%.

- **Püsiva temperatuurikeskkonna katse- "Paneel 1"**

Järgnevalt on esitatud arvutusmudeli niiskussisalduse muutus erinevate õhuvooluhulkade korral, seadme SMC PFM 710 mõõtevahemikust 0,2-10 l/min. "Paneel 1" avatud villapind on kaetud ülalt veeaurutiheda teibiga ($S_d = 15$ m) ning alumine villapind (400x30 mm) on keskkonnale avatud (vt *Joonis 3.1*). Niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral on näidatud *Joonis 3.2*.



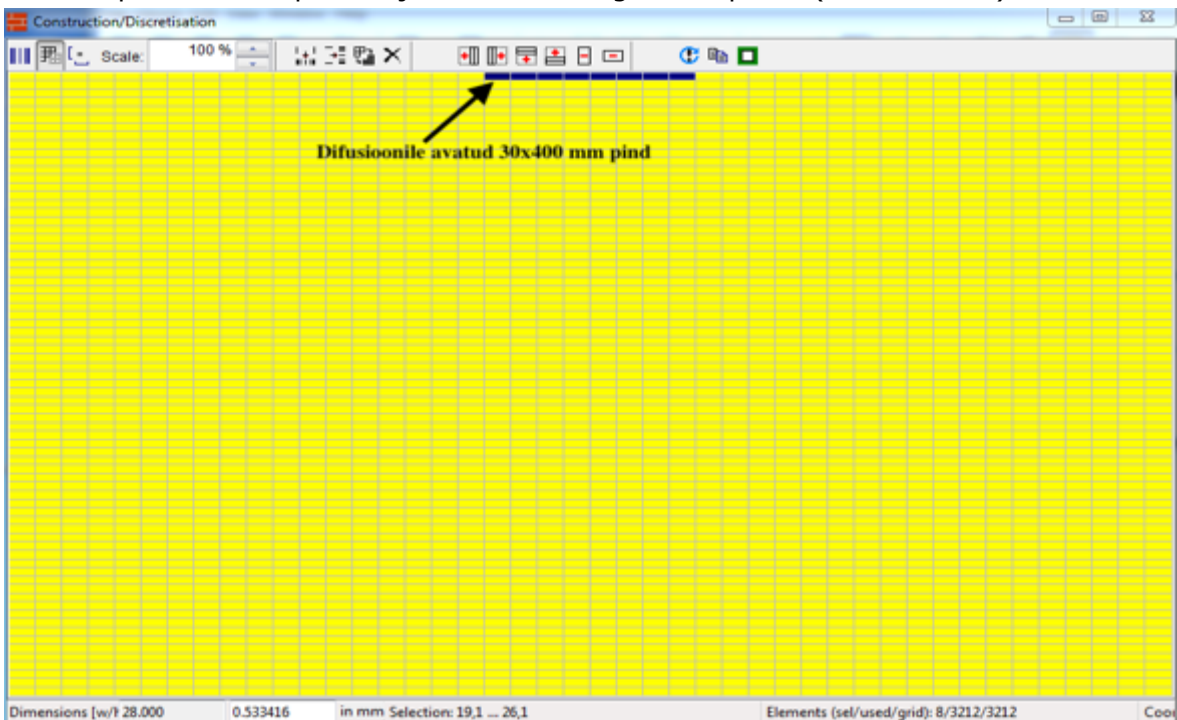
Joonis 3.1 Skeem "Paneel 1" arvutusmudeli kohta. Kivivill on joonisel tähistatud kollasega, kõrgusega 1200 mm ja laiusel 230 mm. Sinine osa tähistab plekki paksusega 1 mm. Difusiooni läbi valge osa ei toimu, niiskusvahetus ainult õhuvoolu teel.



Joonis 3.2 Prognoositav niiskussisalduse vähenemine püsiva temperatuurikeskkonna katses erinevate õhuvooluhulkade korral ja ilma õhuvooluta

- **Püsiva temperatuurikeskkonna katse- "Paneel 2"**

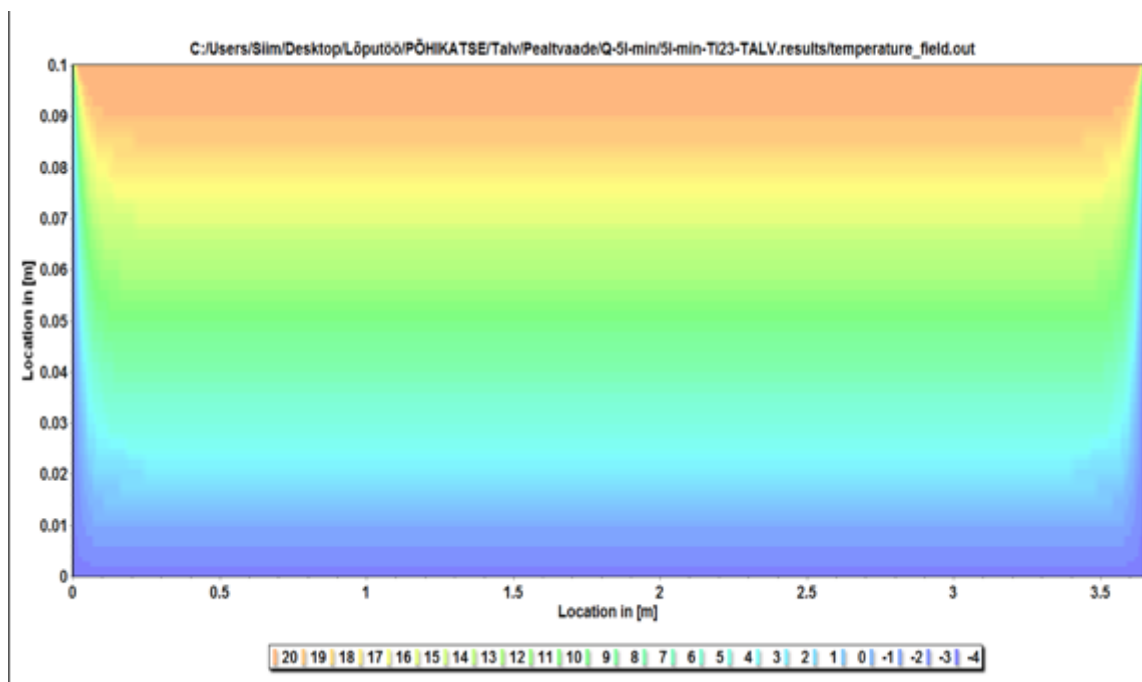
"Paneel 2" kuivatamisel õhuvoolu ei kasutatud, kuivamine toimus ainult paneeli ülaosas asuva 400x30 mm suuruse avatud pinna kaudu, difusiooni teel (vt Joonis 3.3). Võrreldes ventileerimata katsekeha kuivamist ventileeritud katsekehaga võib näha, et paneeli läbival õhuvoolul on suurem mõju niiskuse väljakuivamisele kui 400x30 mm suurusel avatud pinnal antud paneeli ja keskkonnatingimuste puhul (vt Joonis 3.2).



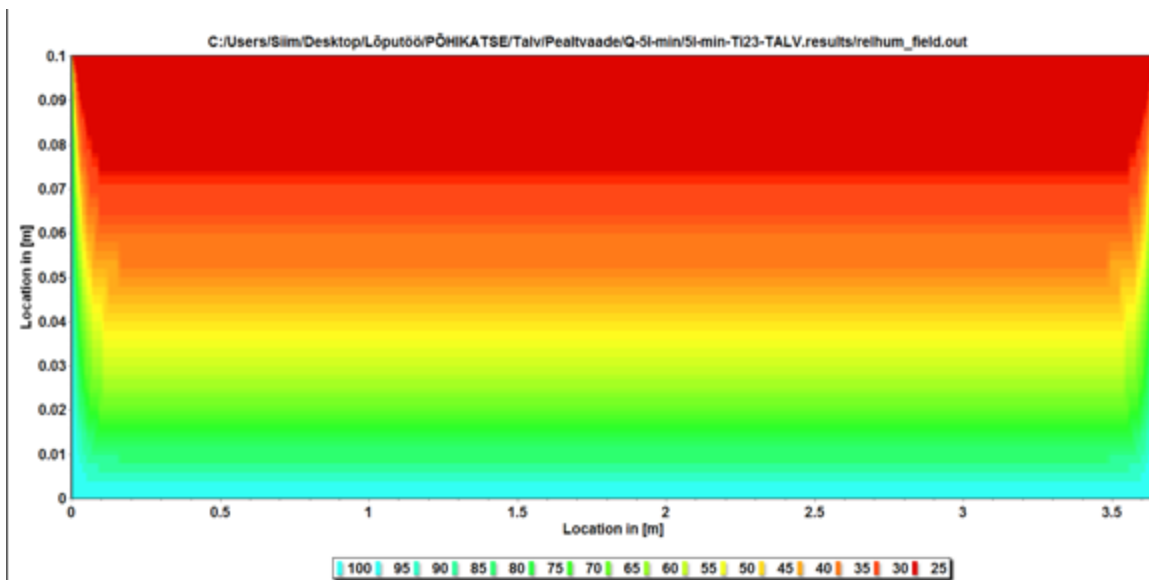
Joonis 3.3 Skeem "Paneel 2" arvutusmudeli kohta. Kollasega on näidatud kivivill kõrgusega 1200 mm ja laiusega 230 mm

- **Muutuva temperatuurikeskkonna katse**

Muutuva temperatuurikeskkonna katse toimus siseruumi ja väliskeskkonna vahel lõunafassaadil, mis tähendab pidevalt muutuvat välistemperatuuri ja suhtelist niiskust. Tekib temperatuuri- ja niiskusgradient läbi paneeli paksuse. See tekitab olukorra, kus üle hügrokoopse ala piiri olev niiskus võib kondenseeruda jahedama pinna lähedusse. Muutuva temperatuurikeskkonna katse õhuvooluhulga leidmisel on kasutatavaks sisetingimusteks +23°C ning välistingimustena on kasutatud (temperatuur ja suhteline niiskus) reaalseid kliimaandmeid, mis on keskmistatud hooajale (vt Tabel 2.5.) [5]. Mudelis on villa sisemine niiskussisaldus 1 liiter 0,438 m³ kohta (2,28 l/m³) ning temperatuur +23°C. Kõikides edaspidi tehtavates arvutustes on hoitud sama villa niiskussisaldust, 2,28 l/m³. Esimese 24 tunni jooksul toimub temperatuuri- ja niiskusgradiendi välja kujunemine, peale mida algab arvutus difusioonile ja konvektsioonile läbi paneeli (vt Joonis 3.4 ja Joonis 3.5).



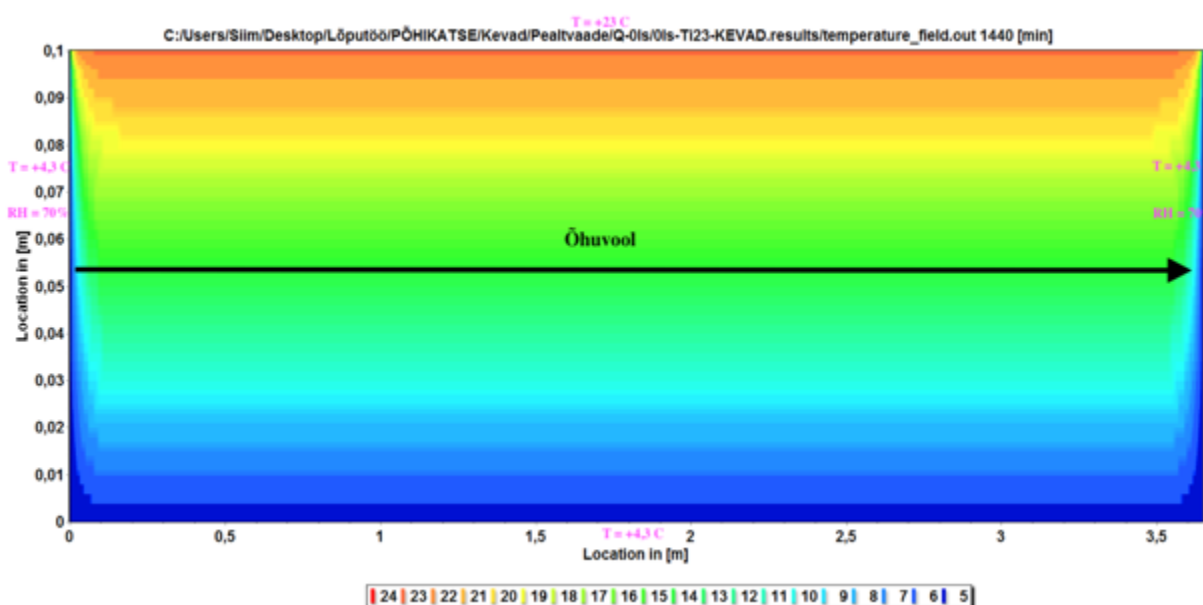
Joonis 3.4 Temperatuurigradieni üle paneeli talveperioodil peale 24 tundi, enne niiskusvahetuse algust väliskeskkonnaga



Joonis 3.5 Suhtelise niiskuse muutus üle paneeli pealtvaate talveperioodil peale 24 tundi, enne niiskusvahetuse algust väliskeskkonnaga

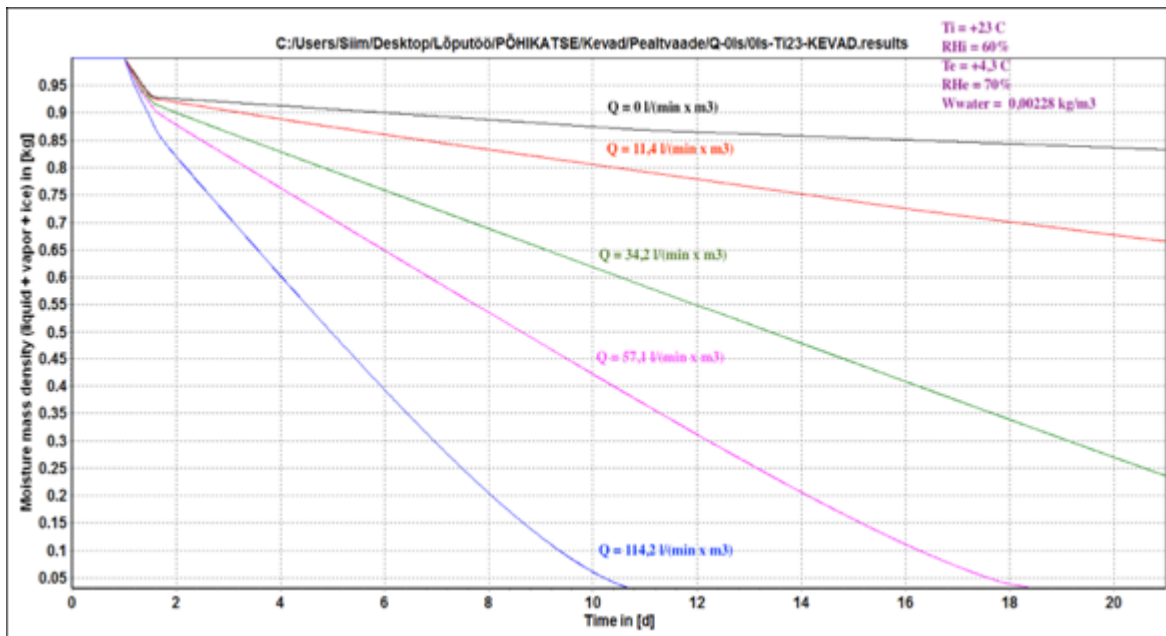
- **Muutuva temperatuurikeskkonna katse - kevadhooaeg**

Järgnevalt on esitatud muutuva temperatuurikeskkonna katse arvutusmudeli niiskussisalduse muutus erinevate õhuvooluhulkade korral, seadme SMC PFM 725 mõõtevahemikust 0,5-25 l/min. Difusiooni teel kuivav mudel on niiskusele avatud paremalt ja vasakult ning konvektsiooni teel kuivava arvutusmudeli õhuvoolu liikumine toimub vasakult paremale. Kevadhooajale keskmistatud välistemperatuur +4,3°C on rakendatud vasakule, alumisele ja paremale pinnale, kevadhooaja keskmistatud suhteline niiskus 70% on rakendatud vasakule ja paremale pinnale. Ülemisel pinnal mõjub sisetemperatuur +23°C (vt Joonis 3.6)



Joonis 3.6 Kevadhooaja keskmistatud ääritingimused ja temperatuurigradient üle seinä arvutusmudeli peatvaate

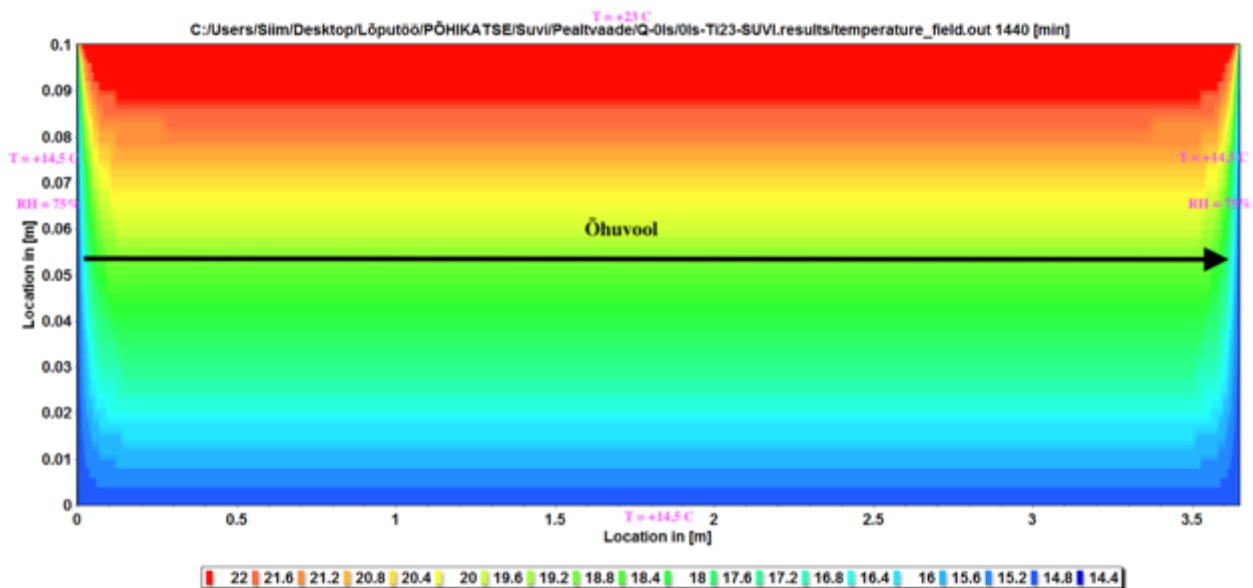
Niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral on näidatud *Joonis 3.7*. Õhuvooluhulk $114 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$ on antud ilmestamiseks olukorda, kus õhuvool liigub kaks korda kiiremini kui seade SMC PFM 725 mõõta võimaldab. Kuna märkimisväärne kuivamiskiiruse võit ajaühikus saavutatakse väiksemate õhuvooludega, siis loeme kevadhooajal seadme SMC PFM 725 mõõtevahemiku piisavaks maksimaalse mõõdetava õhuvooluhulgaga $57 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$.



Joonis 3.7 Testseina arvutusmudeli niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral kevadhooajal

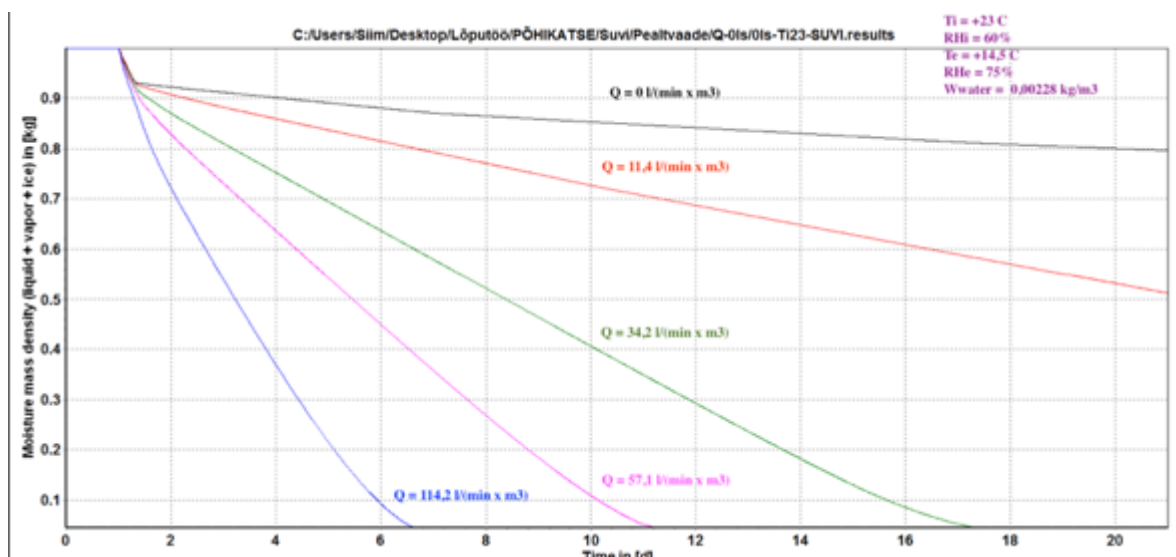
- **Muutuva temperatuurikeskkonna katse - suvehooaeg**

Järgnevalt on esitatud muutuva temperatuurikeskkonna katse arvutusmudeli niiskussisalduse muutus erinevate õhuvooluhulkade korral, seadme SMC PFM 725 mõõtevahemikust $0,5\text{-}25 \text{ l}/\text{min}$. Difusiooni teel kuivav mudel on niiskusele avatud paremalt ja vasakult ning konvektsiooni teel kuivava arvutusmudeli õhuvoolu liikumine toimub vasakult paremale. Suvehooajale keskmistatud välistemperatuur $+14,5^\circ\text{C}$ on rakendatud vasakule, alumisele ja paremale pinnale, suvehooaja keskmistatud suhteline niiskus 75% on rakendatud vasakule ja paremale pinnale. Ülemisel pinnal mõjub sisetemperatuur $+23^\circ\text{C}$ (vt *Joonis 3.8*).



Joonis 3.8 Suvehooaja keskmistatud ääritingimused ja vastav sein temperatuurijaotus üle sein arvutusmudeli pealtvaate

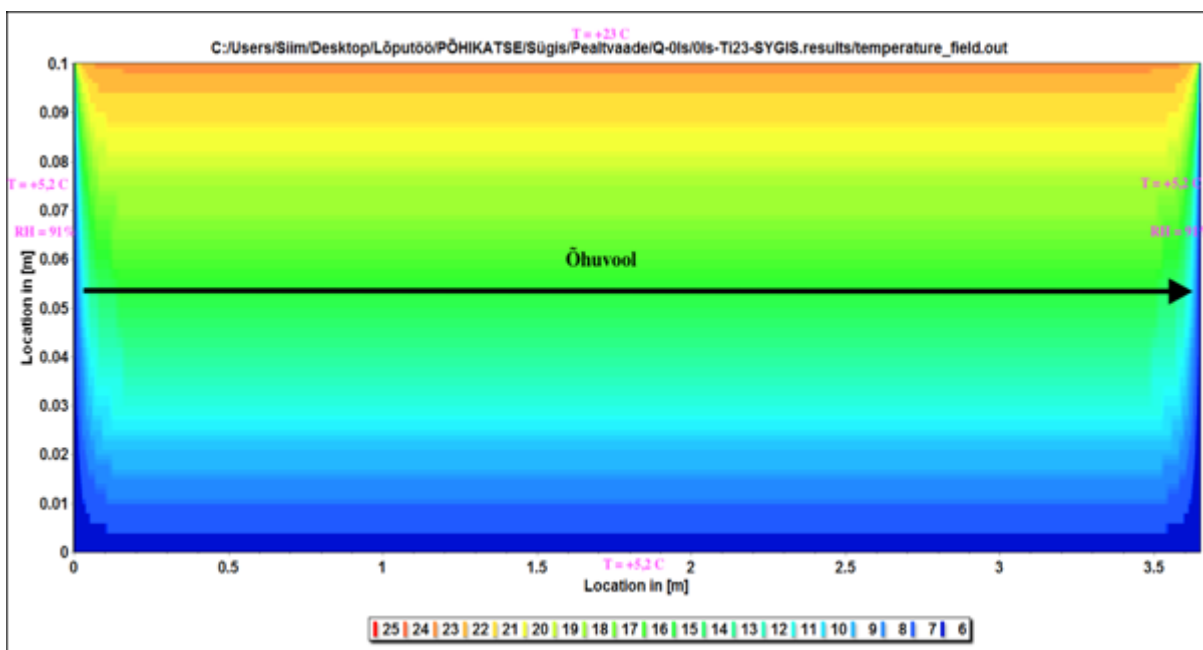
Niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral on näidatud Joonis 3.9. Õhuvooluhulk $114 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$ on antud ilmestamiseks olukorda, kus õhuvool liigub kaks korda kiiremini kui seade SMC PFM 725 mõõta võimaldab. Kuna märkimisväärne kuivamiskiiruse võit ajaühikus saavutatakse väiksemate õhuvooludega, siis loeme suvehooajal seadme SMC PFM 725 mõõtevahemiku piisavaks maksimaalse mõõdetava õhuvooluhulgaga $57 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$. Võrreldes kevadperioodiga on suveperioodil kuivamine kiirem kuna temperatuurigradient üle paneeli on väiksem ning niiskus on paneelis jaotunud ühtlasemalt ja seega külmema pinna lähedale koondunud niiskus vedelal kujul madalam.



Joonis 3.9 Testseina arvutusmudeli niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral suvehooajal

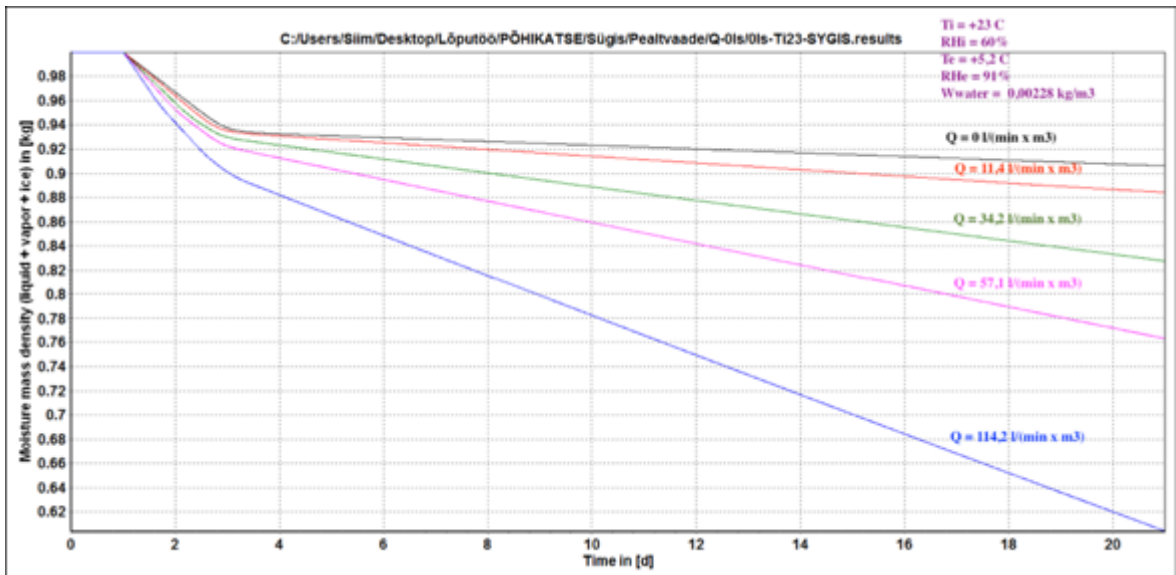
- **Muutuva temperatuurikeskkonna katse - sügishooaeg**

Järgnevalt on esitatud muutuva temperatuurikeskkonna katse arvutusmodeli niiskussisalduse muutus erinevate õhuvooluhulkade korral, seadme SMC PFM 725 mõõtevahemikust 0,5-25 l/min. Difusiooni teel kuivav mudel on niiskusele avatud paremalt ja vasakult ning konvektsiooni teel kuivava arvutusmodeli õhuvoolu liikumine toimub vasakult paremale. Sügishooajale keskmistatud välistemperatuur +5,2°C on rakendatud vasakule, alumisele ja paremale pinnale, sügishooaja keskmistatud suhteline niiskus 91% on rakendatud vasakule ja paremale pinnale. Ülemisel pinnal mõjub sisetemperatuur +23°C (vt *Joonis 3.10*)



Joonis 3.10 Sügishooaja keskmistatud ääritingimused ja vastav seinatemperatuurijaotus

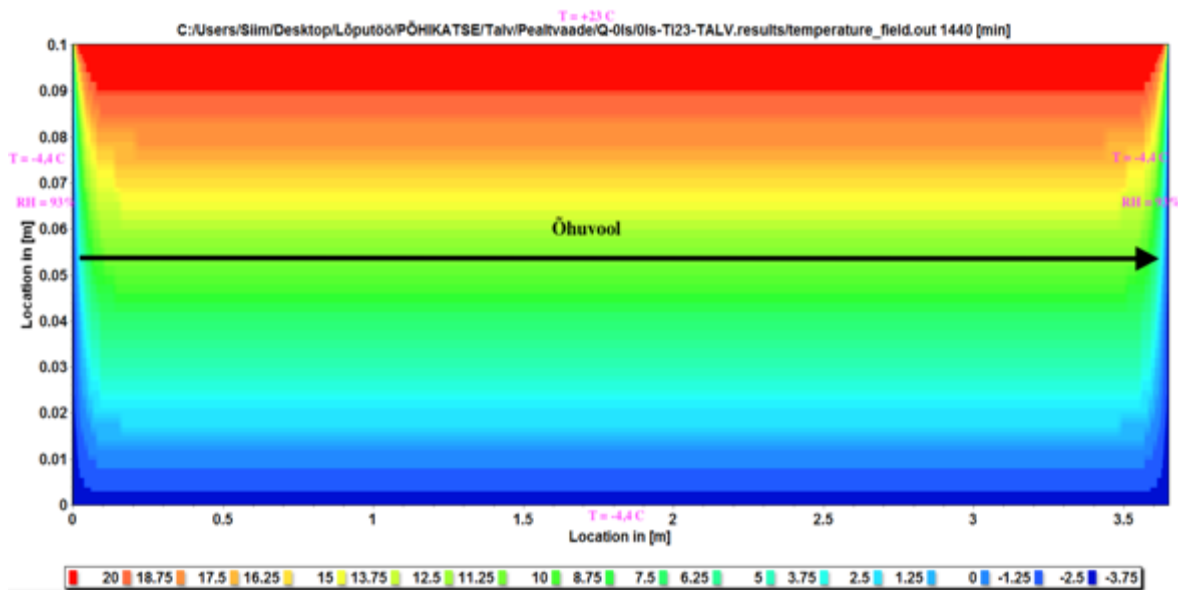
Niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral on näidatud *Joonis 3.11*. Õhuvooluhulk 114 l/(min*m³) on antud ilmestamiseks olukorda, kus õhuvool liigub kaks korda kiiremini kui seade SMC PFM 725 mõõta võimaldab. Sügishooaja kõrgem suhteline niiskus pikendab kuivamisprotsessi oluliselt. Isegi õhuvooluhulga 114 l/(min*m³) korral ei saavutata 21 päeva jooksul tasakaaluniiskust. Seega tuleks sügisperioodil rakendada suuremat õhuvooluhulka või kaaluda kuivatamist suve- või kevadhooajal.



Joonis 3.11 Testseina arvutusmudeli niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral sügishooajal

- **Muutuva temperatuurikeskkonna katse - talvehooaeg**

Järgnevalt on esitatud põhikatse testseina niiskussisalduse muutus erinevate õhuvooluhulkade korral, seadme SMC PFM 725 mõõtevahemikust 0,5-25 l/min. Difusiooni teel kuivav mudel on niiskusele avatud paremalt ja vasakult ning konvektsiooni teel kuivava arvutusmudeli õhuvoolu liikumine toimub vasakult paremale. Talvehooajale keskmistatud välistemperatuur -4,4°C on rakendatud vasakule, alumisele ja paremale pinnale, talvehooaja keskmistatud suhteline niiskus 93% on rakendatud vasakule ja paremale pinnale. Ülemisel pinnal mõjub sisetemperatuur +23°C (vt Joonis 3.12)

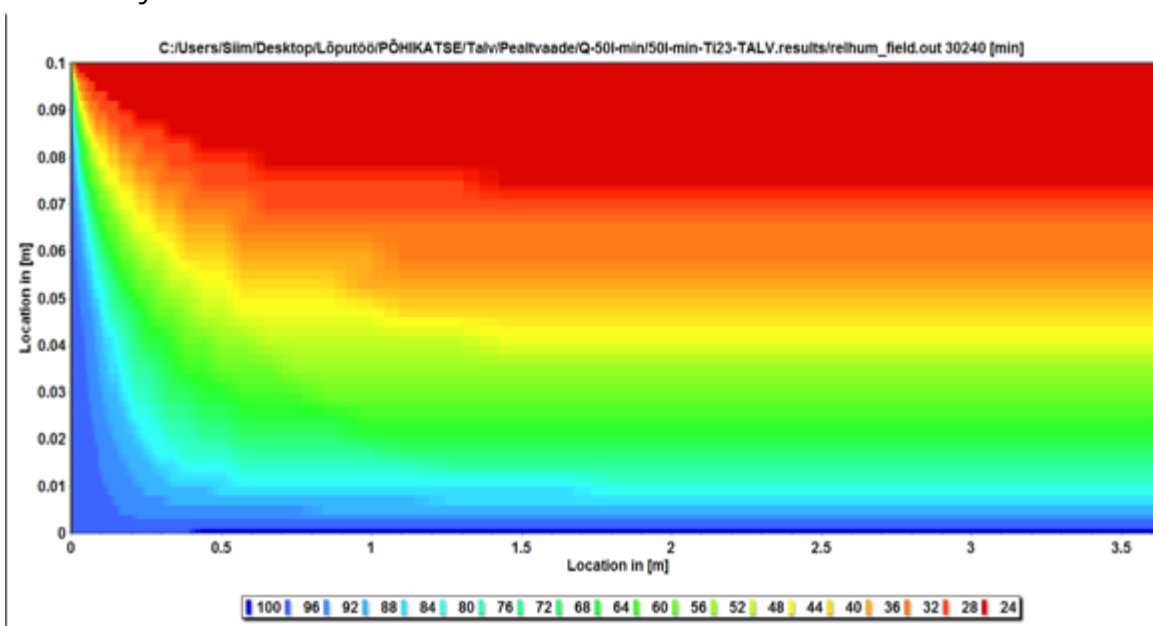


Joonis 3.12 Talvehooaja keskmistatud ääritingimused ja vastav seina temperatuurijaotus üle arvutusmudeli pealtvaate

Niiskussisalduse vähenemine erinevate õhuvooluhulkade korral on näidatud Joonis 3.13.

Talvehooaja negatiivne temperatuur loob eeldused üle hügrokoopse piiri oleva vee kogunemiseks külma ruumi sisse. Suurim niiskussisaldus koguneb külma alasse ning kondenseerub. Tekib olukord, kus paneeli sisse tõmmatavas õhus olev niiskus kondenseerub sama pinna lähedale kust välisõhku sisse tõmmati kuna temperatuur on piisavalt madal. Suurenev külm õhuvool suurendab külma ruumala seinas. See olukord välistab paneeli kuivamise ning suurendab niiskusmassi külmas alas. (vt Joonis 3.14). Seega talvehooajal ei ole õhu läbijuhtimisel positiivset mõju paneeli kuivamisele ilma, et sissetõmmatavat õhku soojendataks ning seeläbi külma ruumala vähendataks.

Joonis 3.13 Testseina niiskussisalduse muutumine erinevate õhuvooluhulkade korral talvehooajal

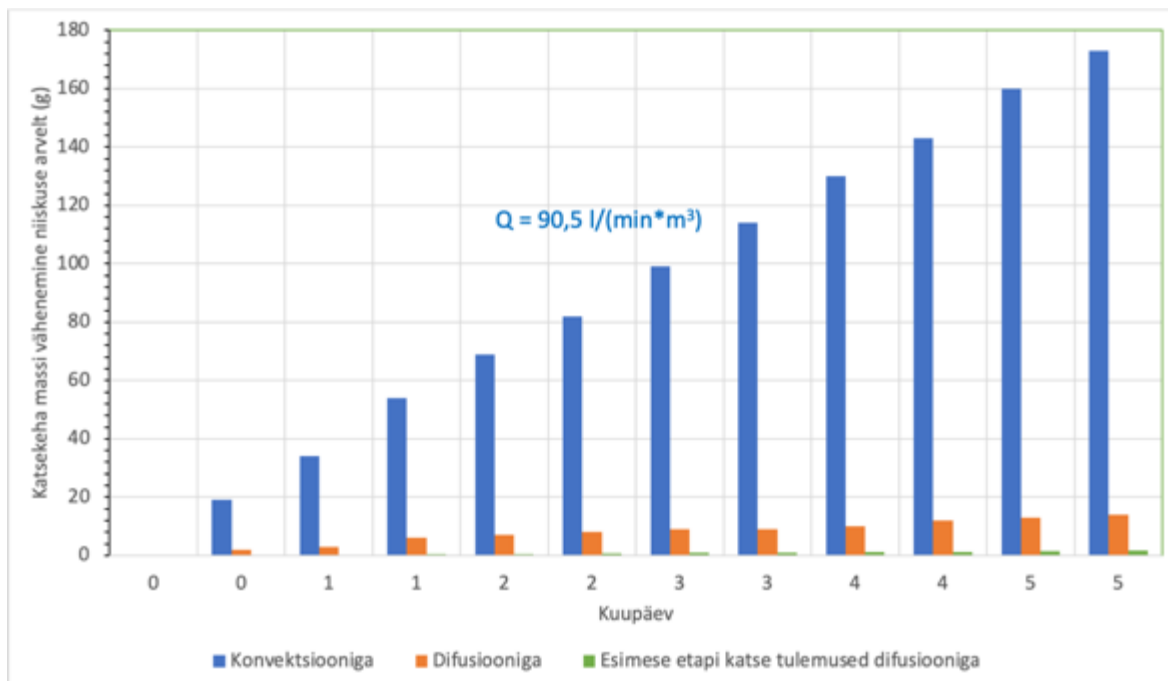


Joonis 3.14 Olukord talvel, kus tulenevalt õhu sisenemiskoha madalast temperatuurist on paneelist väljuv veeauru sisaldus on kuivem kui paneeli sisenev õhk

3.1.2 Püsiva temperatuurikeskkonna katse katsekehade mõõtetulemused

Püsiva temperatuurikeskkonna katse juures mõõdeti katsekehade temperatuuri ja suhtelist niiskust kolmes punktis (Vt joonis Joonis 2.3). Lisaks teostati katsekehade kaalumised 12 tunnise intervalli järel. Difusiooni teel kuivava katsekeha mass vähenes 5,5 ööpäeva jooksul 14 g. Uuringu esimeses etapis toodi välja sarnaste keskkonnatingimuste korral niiskuse väljakuivamise kiiruseks $1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ [2] (vt Joonis 1.3). Käesolevas töös oleva difusioonile avatud pinna ($0,012 \text{ m}^2$) ja kuivamisaja (133 h) juures annab see arvutuslikult niiskusmassi vähenemiseks 1,6 g seitsme ööpäeva jooksul. Teise etapi uuringus töös mõõdeti tulemuseks 14g. Konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha mass langes niiskuse eemaldumise arvelt 5,5 ööpäeva jooksul

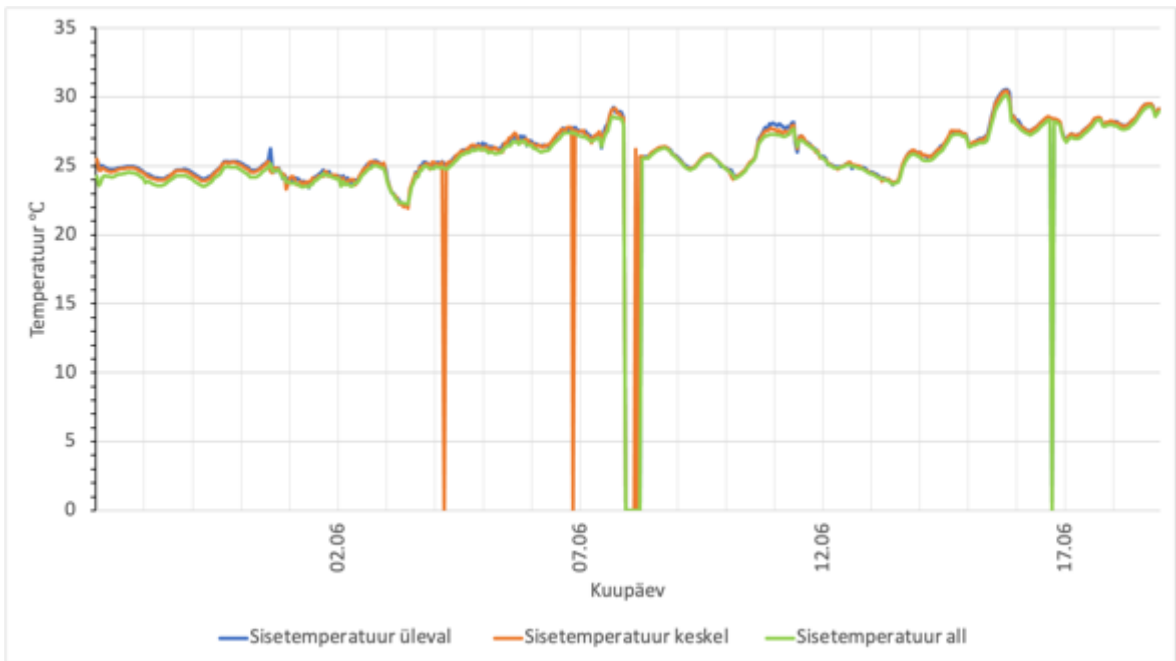
173 g (Vt *Joonis 3.15*). Erinevus difusiooni teel kuivanud katsekeha mõõdetud niiskusmassi vähenemise ning esimese etapi uuringu kohase niiskusmassi vähenemise vahel võib osaliselt olla põhjustatud kasutatud mõõteseadmetest ja osaliselt seni tuvastamata asjaoludest. Antud katses kasutatud kaalu mõõtetäpsuseks on 1g, eelmise etapi uuringus 0,2g. Õhuvool püsiva temperatuurikeskkonna katse vältel oli 10 ± 0.5 l/min.



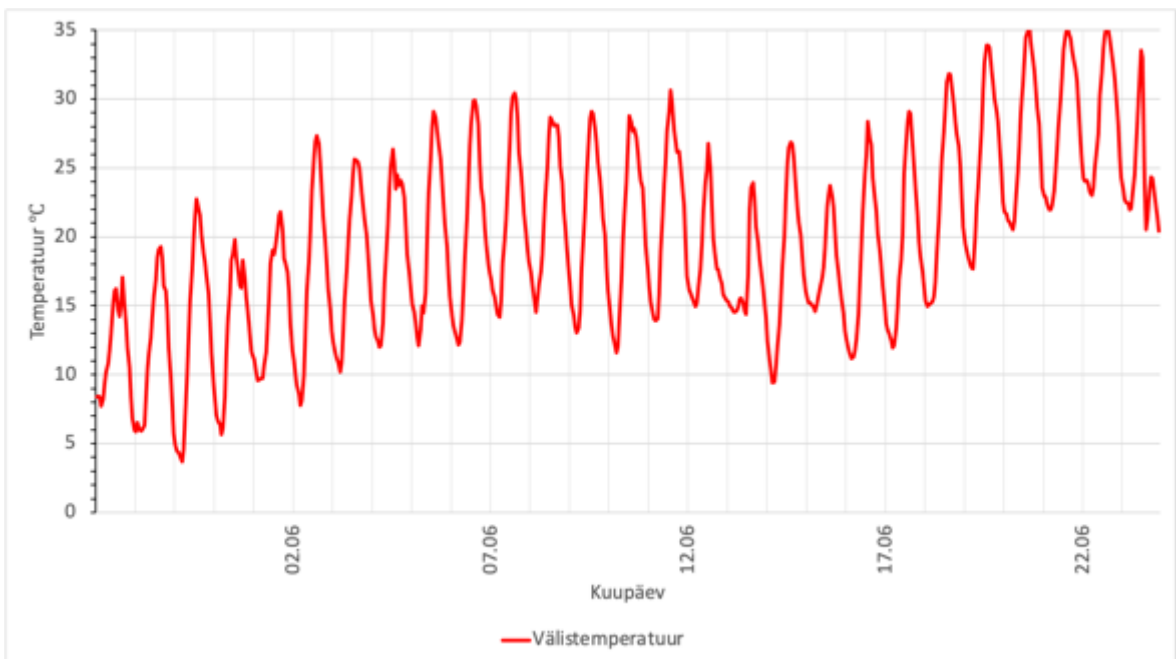
Joonis 3.15 Konveksiooni ja difusiooni teel kuivavate katsekehade niiskusmassi vähenemine püsiva temperatuurikeskkonna katse kuivatusperioodi jooksul

3.1.3 Muutuva temperatuurikeskkonna testseina mõõtetulemused

Arvutusmudeli ääretingimuste määramiseks mõõdeti temperatuuri ja suhtelist niiskust testseina sise- ja välispinna lähedal (vt *Joonis 2.13* ja *Joonis 2.14*). Sisetingimused olid mõõteperioodi kestel suhteliselt muutumatud (vt *Joonis 3.16* ja *Joonis 3.18*). Välistingimustele oli iseloomulik suhteliselt suur ööpäevane kõikumine öise maksimaalse suhtelise niiskuse ja minimaalse temperatuuri ning päevase minimaalse suhtelise niiskuse ja maksimaalse temperatuuri vahel (vt *Joonis 3.17* ja *Joonis 3.19*). Lisaks mõõdeti konveksiooni teel kuivava testseina osa läbivat õhuvoolu kuivatusperioodi vältel (vt *Joonis 3.20*).



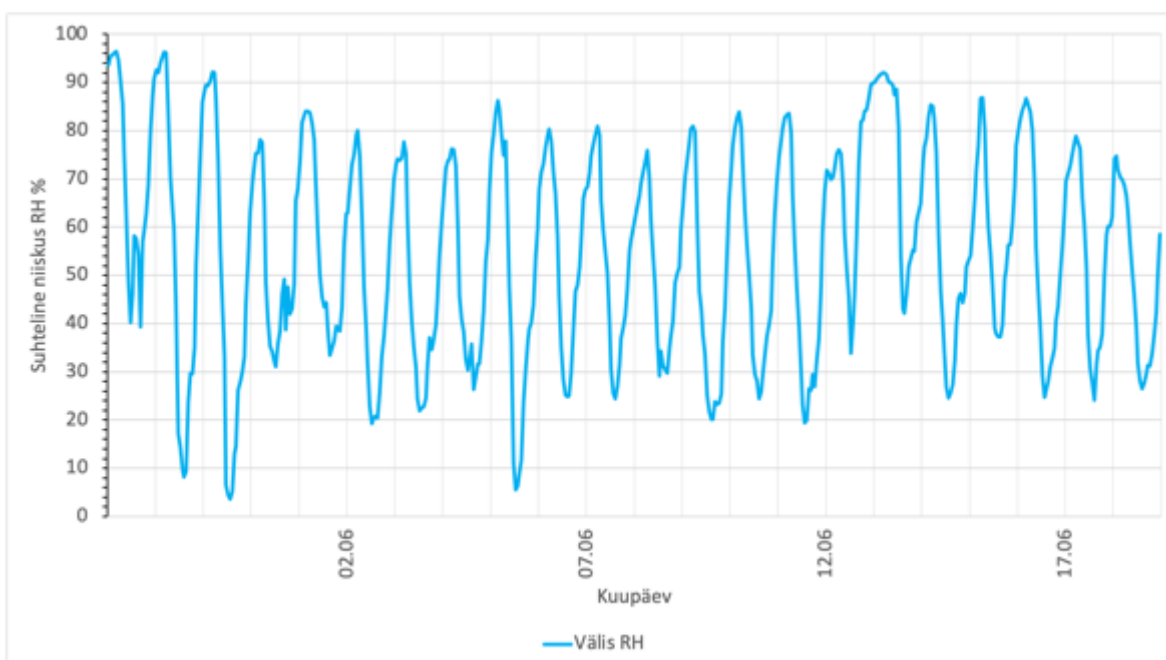
Joonis 3.16 Mõõdetud sisetemperatuur erinevatel ruumi kõrgustel (vt Joonis 2.13). Temperatuurijaotus on kõrguslikult ühtlane. Arvutusmodeli temperatuur võeti mõõtepunktide aritmeetilise keskmisena



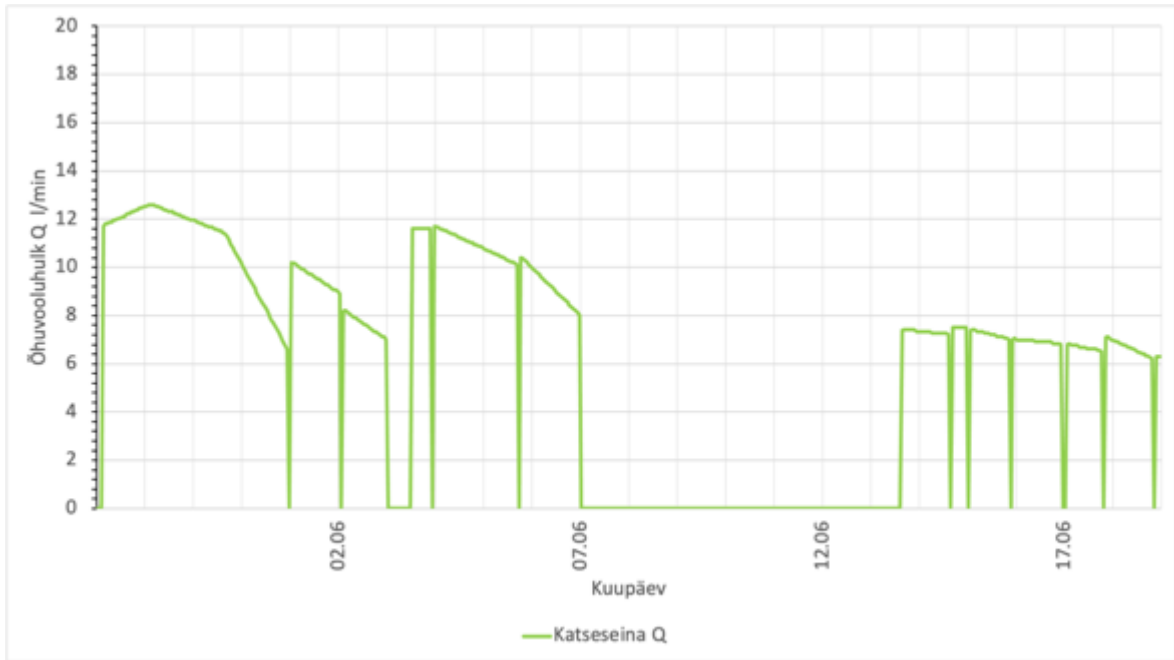
Joonis 3.17 Mõõdetud välisemperatuur testseina kõrval varjestatud alas, mida kasutati arvutusmodeli ääritingimusena (vt Joonis 2.14)



Joonis 3.18 Mõõdetud siseruumi suhteline niiskus erinevatel kõrgustel. Suhtelise niiskuse jaotus kõrguslikult on valdava osa ajast ühtlane



Joonis 3.19 Mõõdetud suhteline niiskus testseina kõrval varjestatud alas, mida kasutati arvutusmudeli ääretingimusena

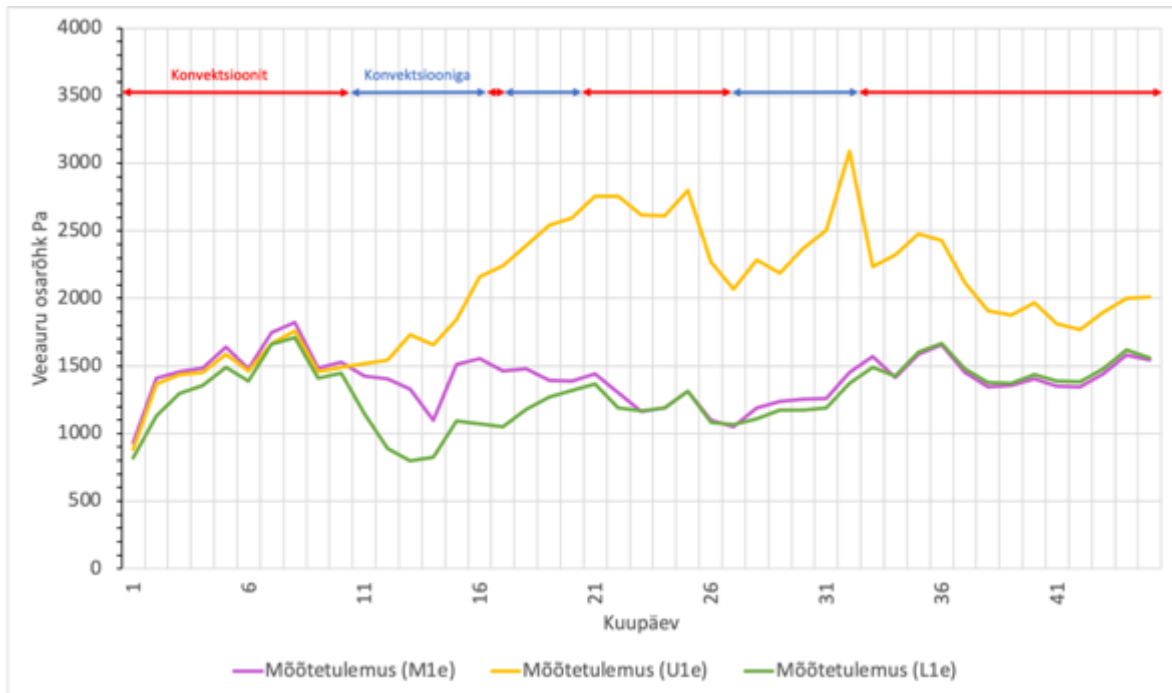


Joonis 3.20 Mõõdetud testseina sisse tõmmatav õhuvool kuivatusperioodi vältel, mida kasutati arvutusmudeli väljatingimusena

Mõõtetulemustest selgub, et konveksiooni teel kuivatatavas testseina osas ei olnud niiskuse ümberjagunemine peale süstimist väga ühtlane kuna süstlapunktid asusid seina ülemise serva lähedal (Vt Joonis 2.8) ning andurid (L1i, L1c, L1e, L2i, L2c, L2e, L3i, L3c, L3e) ei saavutanud ka 10 päeva möödudes võrdseid näite anduritega (M1i, M1c, M1e, M2i, M2c, M2e, M3i, M3c, M3e). Konveksiooni teel kuivatatava testseina osa ülemised mõõtepunktid (algavad M tähega) saavutasid alumises osas asuvate mõõtepunktidega sarnased näidud alles peale kuivatusperioodi lõppu (vt

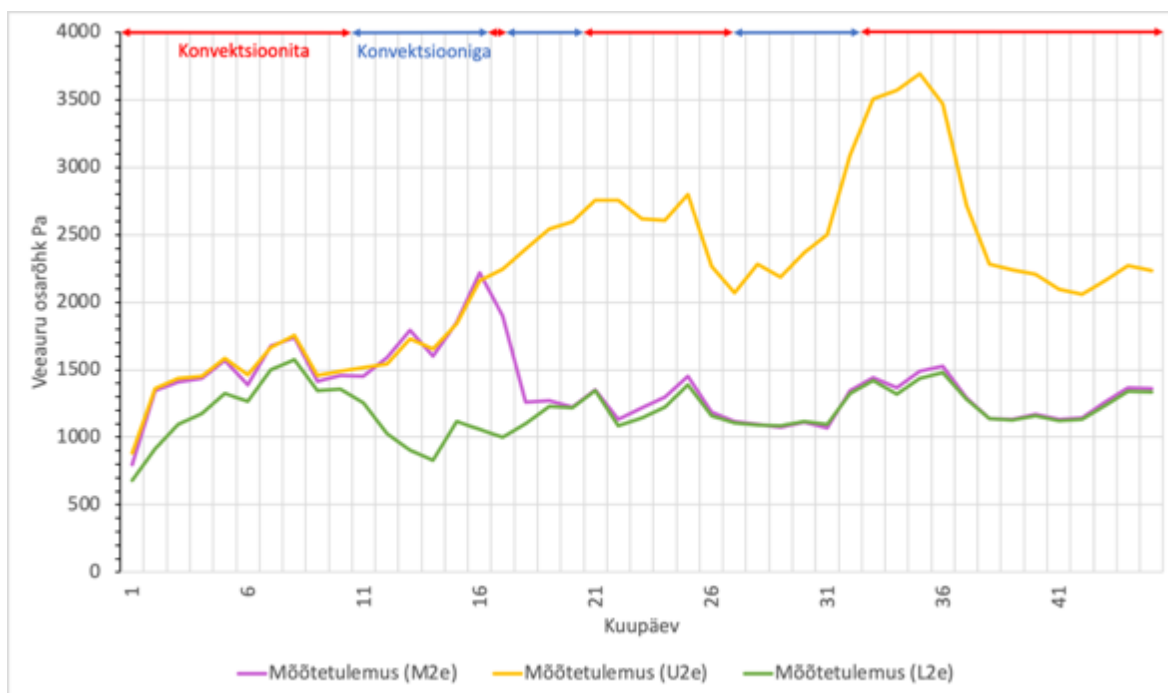
Joonis 3.21, Joonis 3.22 ja Joonis 3.23). Päeva keskmine veeauru osarõhk langeb kõige kiiremini konveksiooni teel kuivava katsekeha õhu sisenemiskoha lähedal, alumises punktis kuhu niiskus ei ole jõudnud lõplikult ühtlustuda. Alloleval joonisel on võrreldud päeva keskmist veeauru osarõhku õhu sisenemiskoha lähedal, välispinnas asuva mõõtepunkti ning difusiooni teel kuivava testseina osa samas kohas asuvas punktis (vt

Joonis 3.21) kuni 2 nädalat peale kuivatusperioodi lõppu. 10 päeva peale kuivatusperioodi algust on konveksiooni teel kuivatatava katsekeha õhu sisenemise poolse osa alumises punktis (L1e) ja difusiooni teel kuivava katsekeha samas otsas asuva mõõtepunkti (U1e) vahe juba rohkem kui kahekordne, vastavalt 2758 Pa ja 1369 Pa.



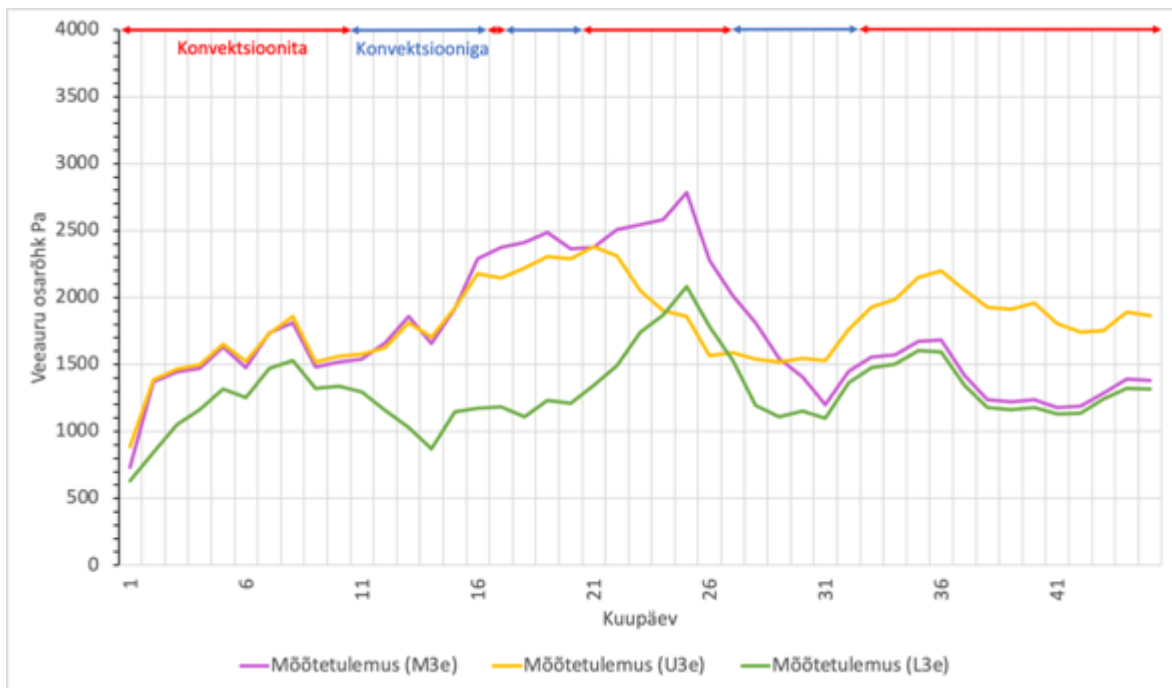
Joonis 3.21 Päeva keskmised veeauru osarõhud punktides U1e, M1e ja L1e (vt Joonis 2.9)

Paneeli keskosas on suurim absoluutne veeauru osarõhu erinevus peale konvektiivse kuivatusperioodi lõppu, 35. päeval, kus mõõdetud välistemperatuur tõusis kuni 34 kraadini, mis viis üles difusiooni teel kuivava katsekeha veeauru osarõhu paneeli keskosas. Sel hetkel oli konvektsiooni teel kuivanud katsekeha päeva keskmise veeauru osarõhk punktis M2e 1492 Pa ning difusiooni teel kuivava katsekeha päeva keskmise veeauru osarõhk punktis U2e 3694 Pa (vt Joonis 3.22). Veeauru osarõhkude võrdlus paneeli keskosas ilmestab hästi niiskuse suutmatust kivivillast välja kuivada ainult difusiooni teel.



Joonis 3.22 Päeva keskmised veeauru osarõhud punktides U2e, M2e ja L2e (vt Joonis 2.9)

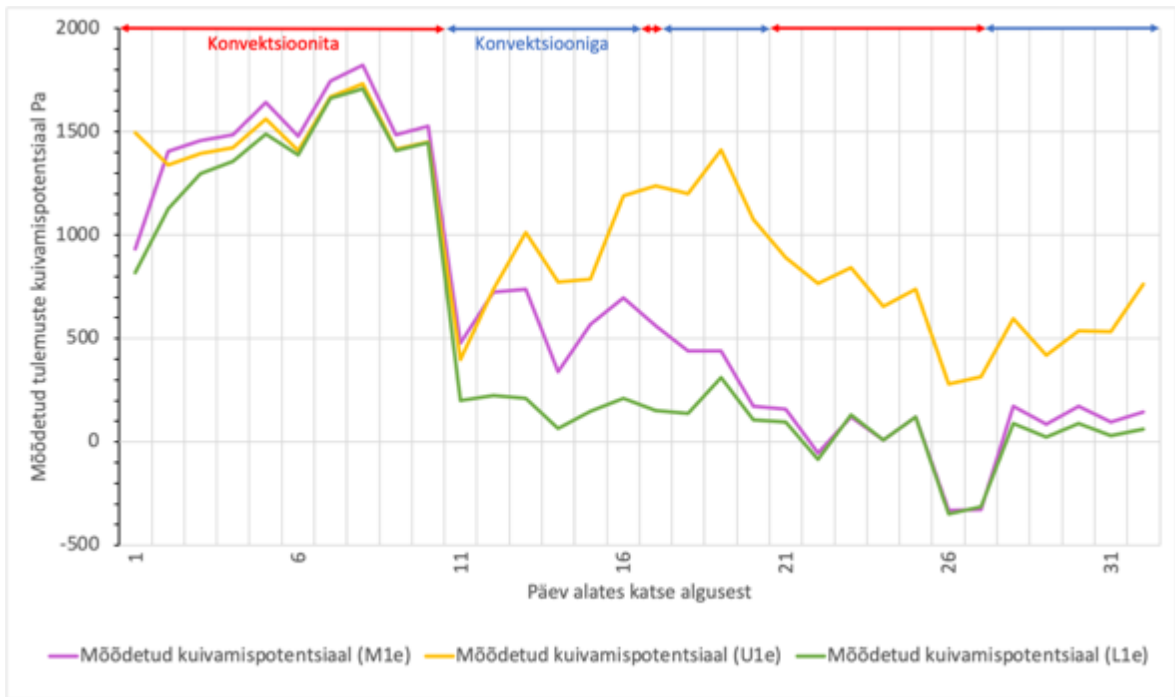
Paneeli väljatõmbe ava juures tekib olukord, kus konvektiivselt kuivav katsekeha on ajutiselt märjem kui difusiooni teel kuivav katsekeha. Vabalt kuivava katsekeha veeauru osarõhk punktis U3e langeb pidevalt alates kuivatusperioodi algusest. Konveksiooni teel kuivava katsekeha punkti M3e veeauru osarõhu vähenemine algab ajal, mil peale tõmmatav õhk on asendanud niiskunud ala kuni punktini M3. Kuna antud juhul asub punkt M3 õhu väljatõmbe avast 300 mm kaugusel, siis õhupumba seiskamine 21. kuivatuspäeval tekitab olukorra, kus õhu väljatõmbe ava ja anduri vahele jäävas 300 mm pikkuses alas puhverdatud niiskus jaguneb õhuvoolu seiskamisel ümber ning veeauru osarõhk punktis M3e ja L3e tõuseb taas, difusiooni teel kuivava katsekeha samas punktis toimub õhuvoolu pausi ajal (kuni 27. kuivatuspäev) veeauru osarõhu langemine (vt Joonis 3.23).



Joonis 3.23 Päeva keskmised veeauru osarõhud punktides U3e, M3e ja L3e (vt Joonis 2.9)

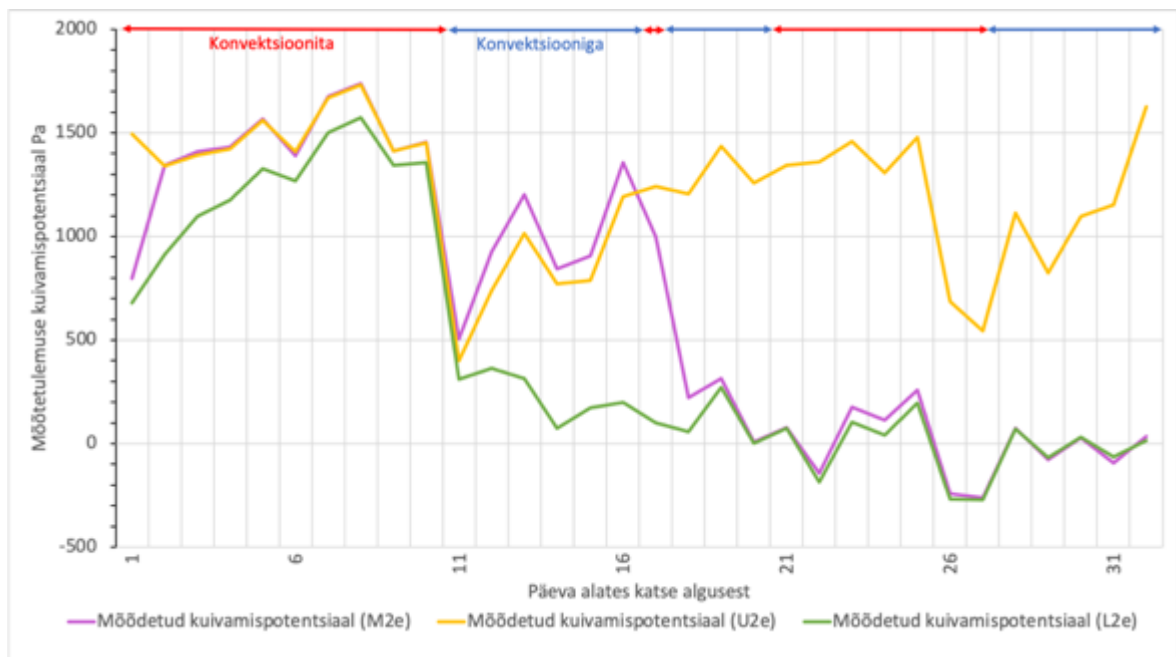
Järgnevalt on esitatud paneeli kuivamispotentsiaal difusiooni teel kuivava katsekeha ja konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha mõõtepunktides kuivatusperioodil (vt Joonis 3.24 , Joonis 3.25 ja Joonis 3.26). Niiskusvahetus väliskeskkonnaga algab 11. päeval, enne seda on väliseks veeauru osarõhuks arvestatud 0 Pa kuna suhtelist niiskust väliskeskkonnas ei mõõdetud. Kuivamispotentsiaal iseloomustab mõõtepunkti ja välisõhu veeauruosarõhkude vahet. Konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha veeauru osarõhk saavutab välisõhuga võrdse olukorra, difusiooni teel kuivav katsekeha aga mitte. Kuivamispotentsiaal 0 näitab, et on saavutatud tasakaaluniiskus ning edasist kuivamist ei toimu. Negatiivne kuivamispotentsiaal tähendab hoopis paneeli niiskumist aja jooksul.

Õhu sisenemise poolse otsa kuivamispotentsiaal konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha alumises ja ülemises punktis (vastavalt L1e ja M1e) ei ühti omavahel tulenevalt erinevast algniiskusest. Punktide kuivamispotentsiaale muutuvad järjest lähedasemaks liikudes ajas edasi kuivatusperioodi lõpu poole (vt Joonis 3.24). Difusiooni teel kuivatava katsekeha samas kohas asuva mõõtepunkti (U1e) kuivamispotentsiaal püsib kogu kuivatusperioodi jooksul kõrgem kui ventileeritavas katsekehas.



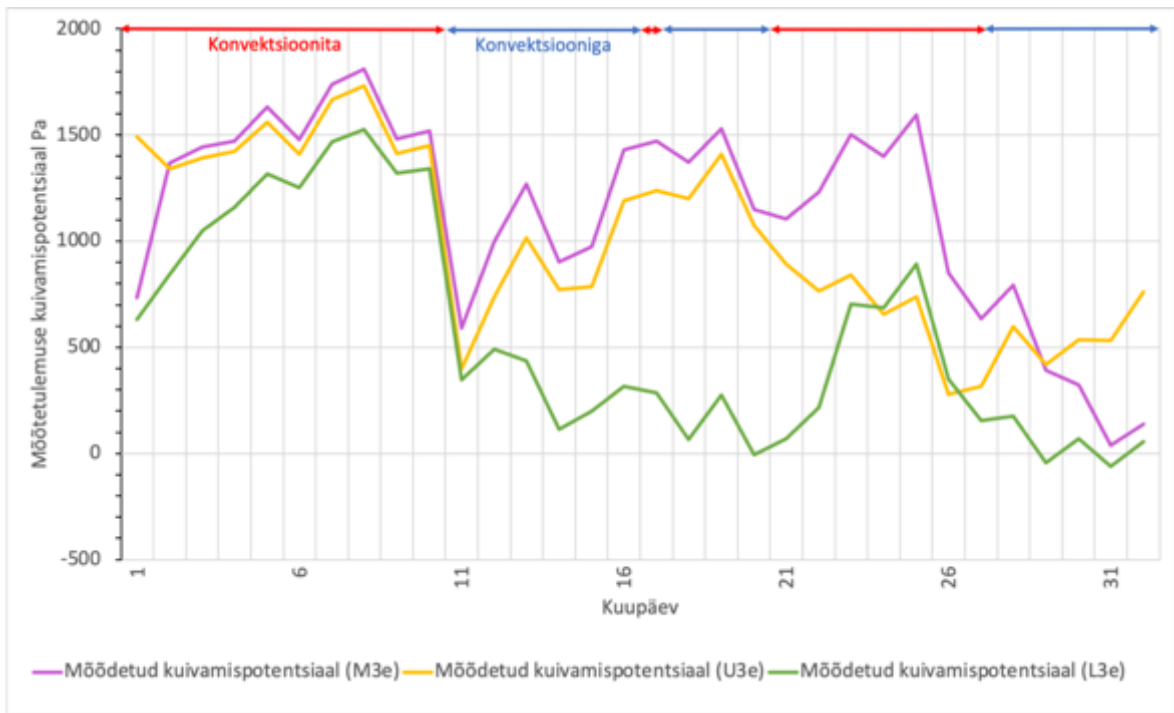
Joonis 3.24 Konvektsiooni ja difusiooni teel kuivatatava katsekeha kuivamispotentsiaal õhu sisenemise poolses otsas mõõteperioodi jooksul

Paneeli keskosa kuivamispotentsiaal konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha alumises ja ülemises punktis (vastavalt L1e ja M1e) ei ühti omavahel, tulenevalt erinevast algniiskusest. Kuna sein keskosas võtab niiske õhu eemaldamine pealetuleva õhuga kauem aega kui õhu sisenemise poolses otsas, siis on suurema algniiskusega punkti (M2e) graafik päevadel 11-16 on pigem sarnasem difusiooni teel kuivava katsekeha punkti kuivamispotentsiaaliga (U2e) kui konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha alumises punktis (L2e) (vt Joonis 3.25).



Joonis 3.25 Konvektsiooni ja difusiooni teel kuivatatava katsekeha kuivamispotentsiaal paneeli keskel mõõteperioodi jooksul

Õhu väljumise poolse otsa kuivamispotentsiaal konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha alumises ja ülemises punktis (vastavalt L1e ja M1e) samuti ei ühti tulenevalt erinevast algniiskusest. Kuna niiske õhu asendamine kuivema välisõhuga toimub õhu väljumise poolses otsas viimasena, siis on ventileeritava paneeli suurema algniiskusega ülemises mõõtepunktis suurim kuivamispotentsiaal kuni kuivamisperioodi lõpuni. 32. kuivatuspäevaks saavutavad konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha õhu väljumise poolse otsa alumine (L3e) ja ülemine (M3e) mõõtepunkt sarnase väärtuse, mis ei erine palju nullist, vastavalt 56 Pa ja 139 Pa. Samaks ajaks on difusiooni teel kuivava katsekeha samas kohas asuva mõõtepunkti (U3e) kuivamispotentsiaal 763 Pa (vt Joonis 3.26)

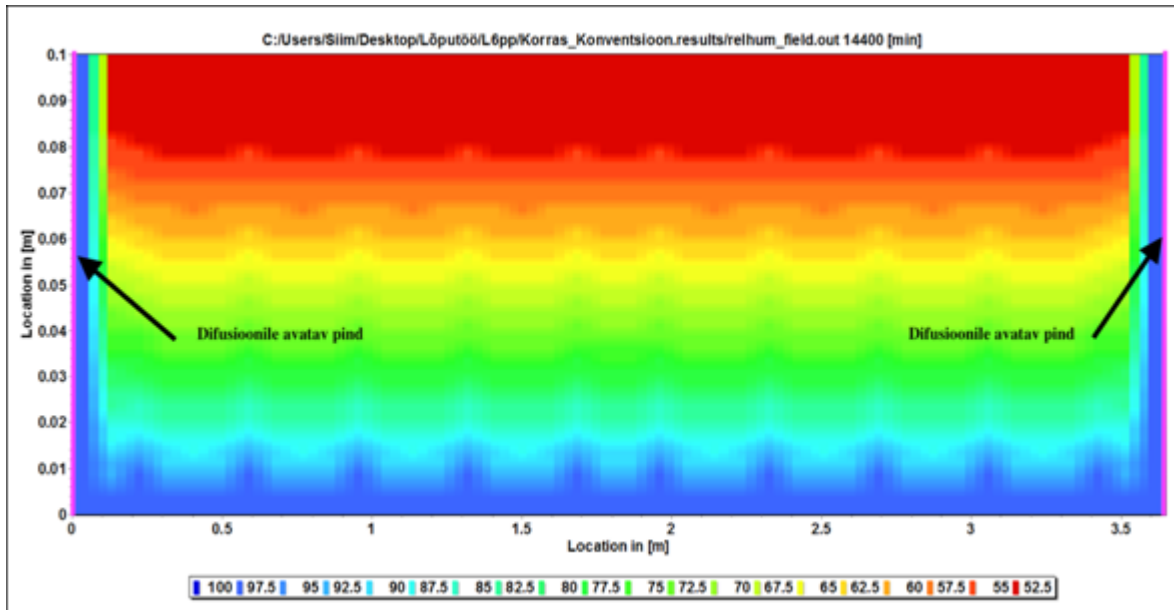


Joonis 3.26 Konvektsiooni ja difusiooni teel kuivatatava katsekeha kuivamispotentsiaal õhu väljumise poolses otsas mõõteperioodi jooksul

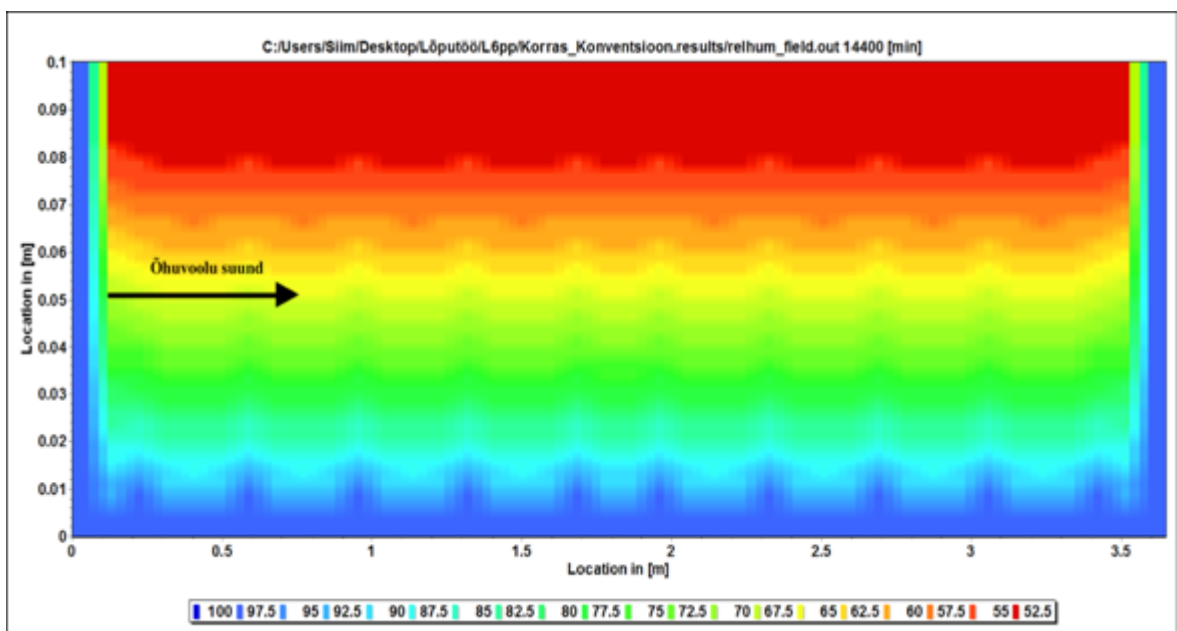
3.2 Katse- ja arvutustulemuste võrdlus

Joonis 3.27 ja *Joonis 3.28* kajastavad arvutusmodeli kohast algniiskuse jaotust konvektsiooni- ja difusiooni teel kuivavas katsekehas hetk enne niiskusvahetuse algust väliskeskkonnaga. Tabel 3.29 kirjeldab mõõtetulemuste varieeruvust arvutustulemustest. Kuna sein kuivamine algab õhu sisenemise poolsest otsast, siis selles osas ühtivad arvutustulemustega paremini katsekeha alumises osas asuvad, madalama algniiskusega mõõtepunktid. Õhu sisenemise poolses otsas on katsekeha ülemises osas asuvatel mõõtepunktidel suurem algniiskus kui arvutusmodelis ja seega võtab kuivamine neis mõõtepunktides kauem aega kui arvutusmodelis. Õhuvoolu teekonna keskel saavad katsekeha alumises osas asuvad mõõtepunktid kiiremini kuivaks kui arvutusmodeli samas kohas kuna niiskus ei ole jõudnud kõrguslikult ühtlustuda ning suurem osa niiskusest on katsekeha ülemises osas asuvate mõõtepunktide juures, mille kuivamine kestab kauem kui arvutusmodelis. Õhuvoolu teekonna lõpus, kus saavutatakse kuivamine viimasena on sarnane olukord paneeli keskosaga. Mõõtepunktid, mis asuvad katsekeha allosas ülehindavad kuivamise kiirust ning suurema algniiskusega mõõtepunktid katsekeha ülaosas alahindavad arvutusmodeli kohast kuivamise kiirust. Mõõtepunktide paremaks ühildumiseks arvutuspunktidega oleks pidanud süstlapunktide arvu suurendama konvektsiooni teel kuivava katsekeha kõrguses, et jaotada niiskust ühtlasemalt. Samas oli iga täiendav ava paneelis potentsiaalne õhulekke koht ning seetõttu sai süstitud kõrguslikult ühte punkti. Konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha õhuvoolu väljumiskoha ülaosas asuva punkti (M3e) mõõdetud ja arvutatud temperatuuri kuivatusperioodi kestel kujutab *Joonis 3.30*.

Joonis 3.31 kujutab sama punkti veeauru osarõhu võrdlust mõõte- ja arvutustulemuse vahel. *Joonis 3.32* kirjeldab sama punkti suhtelise niiskuse mõõte- ja arvutustulemuse võrdlust. Ülejäänud punktide arvutus- ja mõõtetulemuste võrdlus asub Lisa 1 all.



Joonis 3.27 Hetk enne niiskusvahetuse algust difusiooni teel kuivavas testseina osas. Joonisel on näidatud suhtelise niiskuse jaotus kivivillas, üle seina horisontaallõike.



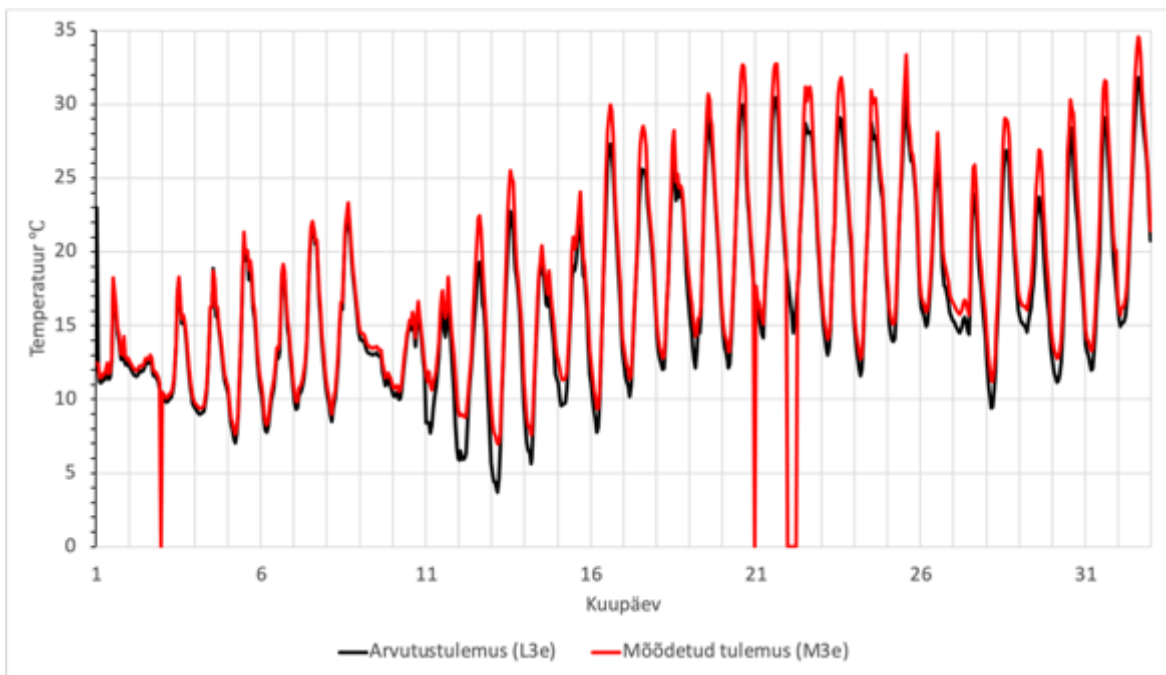
Joonis 3.28 Hetk enne niiskusvahetuse algust konvektsiooni teel kuivavas testseina osas. Joonisel on näidatud suhtelise niiskuse jaotus kivivillas, üle seina horisontaallõike.

Tabelist 3.29 nähtub, et konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha alumistes punktides (algavad tähega "L") on keskmise mõõte- ja arvutustulemuse vahe negatiivne, mis tähendab madalamat veeauru osarõhku kui arvutusmodelis. Konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha ülemistes mõõtepunktides (algavad tähega "M") on keskmiste veeauru osarõhkude vahe positiivne (välja arvatud M2e), mis tähendab suuremat veeauru osarõhku kui arvutusmodelis. Sellest võib taaskord järeldada, et suurem osa niiskusest on katsekeha ülemise osa ja süstlapunktide lähedal ega ole lõplikult ümber jagunenud. Suurim erinevus on õhu väljumise poolse mõõtepunkti (L3e) ja arvutusmodeli sama punkti vahel. Pidev õhuvool kuivatab katsekeha alumisse osasse ümber jagunenud niiskuse välja kuni kuivamispotentsiaali kadumiseni juba enne kuivatusperioodi lõppu. Arvutusmodelis kuivab õhuvoolu teekonna lõpus asuv punkt viimasena kuna seda läbib niiske õhk, mis on tulnud õhuvoolu teekonna algusest ning õhuvoolu teekonna lõpus asuva punkti kuivamiseks peab kogu eelnev teekond olema juba kuivanud. Difusiooni teel kuivava katsekeha (algustähega "U") mõõtetulemused klapiivad paremini arvutustulemustega kuna katsekeha on madalam ja niiskuse ühtlustumine kiirem ning niiskuse ühtlustumist ei häiri välistingimustega õhuvool. Siiski esineb ka difusiooni teel kuivava katsekeha mõõte- ja arvutustulemuste vahel erinevus kuna vesi on süstitud kõrguslikult ühte punkti, mitte üle kogu süstlapunkti kõrguse nagu arvutusmodelis.

Asukoht	Mõõtetulemus-Arvutustulemus (Pa)		
	Suurim erinevus (Pa)	Keskmine erinevus (Pa)	Standardhälve (Pa)
L1e	579	-36	233
L2e	993	-259	293
L3e	1159	-443	357
M1e	707	124	245
M2e	696	-19	176
M3e	761	140	199
U1e	625	47	149
U2e	609	87	137
U3e	610	31	175

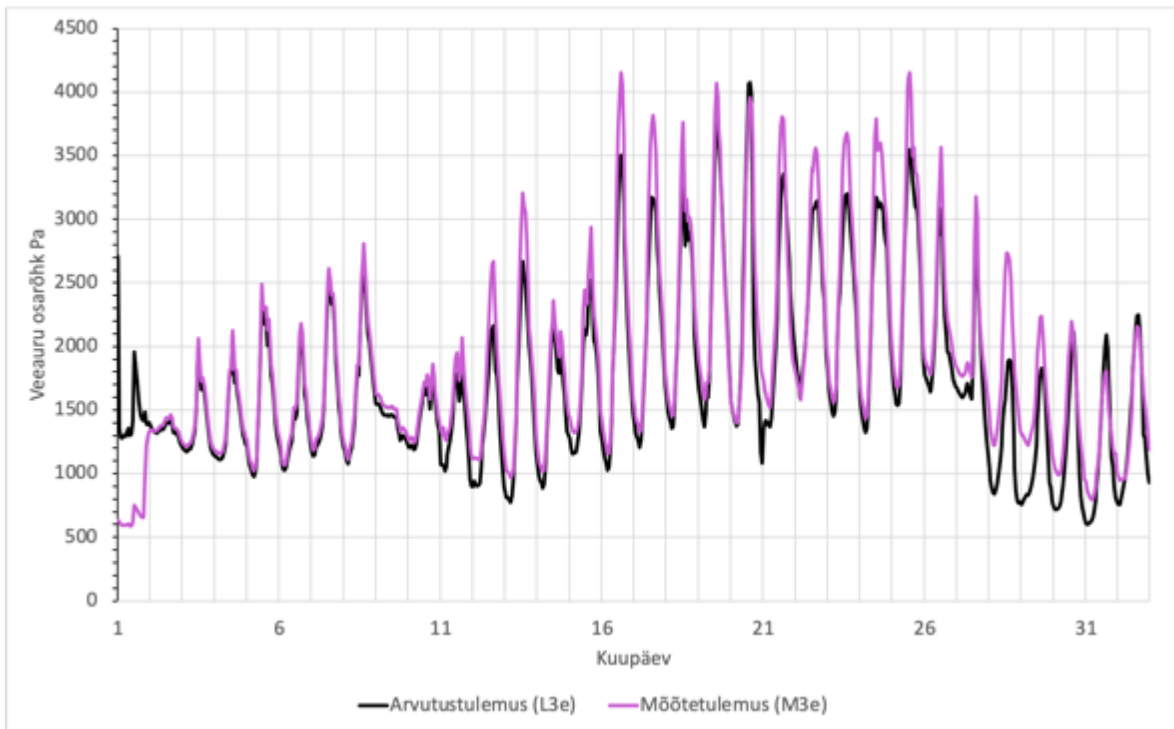
Tabel 3.29 Mõõtetulemuste varieeruvus arvutustulemustest

Joonis 3.30 kirjeldab konvektsiooni teel kuivatatava katsekeha õhuvoolu teekonna lõpus ning kõrguslikult ülaosas asuva mõõtepunkti temperatuuri võrrelduna arvutusmodeli temperatuuriga. Mõõtetulemuse maksimaalsed ja minimaalsed väärtused on pisut kõrgemad kui arvutusmodelis. See võib olla põhjustatud välistemperatuuri mõõtvanduri (mida kasutati arvutusmodelis ääritingimusena) paremast varjestusest päikese eest võrrelduna seina pinna varjestusega päikese eest (vineer+foolium vs koormakate).



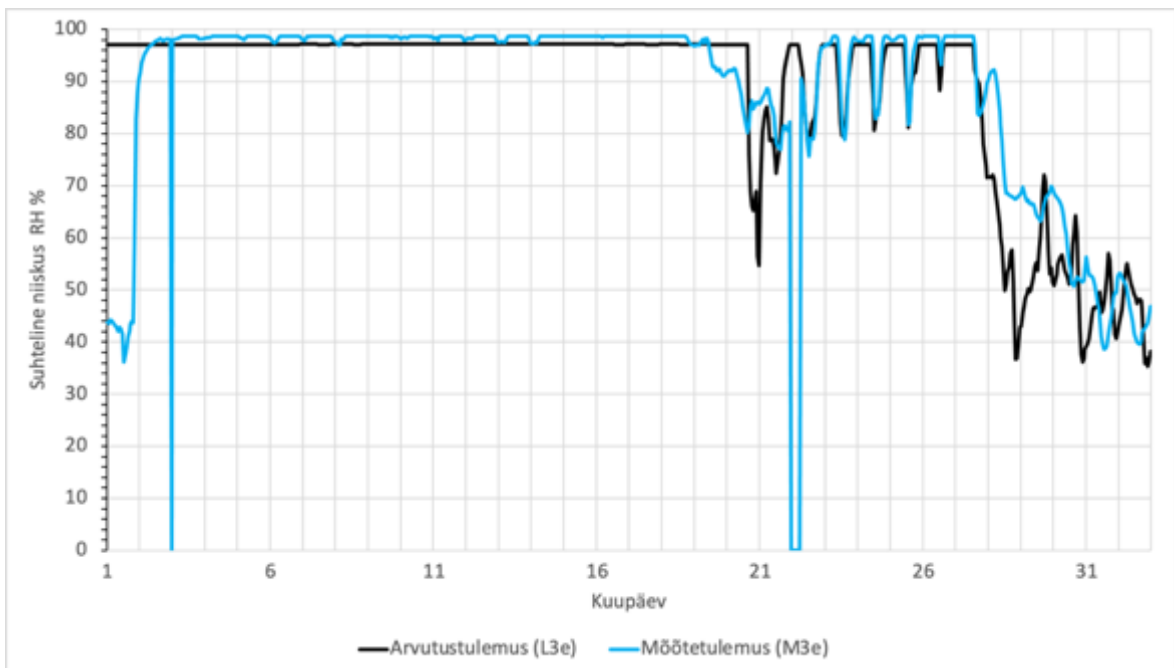
Joonis 3.30 Mõõdetud temperatuur punktis M3e ja arvutusmodeli temperatuur L3e

Alloleval joonisel 3.31 on näidatud veeauru osarõhu võrdlus samas punktis. Kuna veeauru osarõhu moodustab temperatuuri ja suhtelise niiskuse seos, siis mõjutab mõõdetud tulemuse ühildumist arvutustulemusega nii temperatuuride kui suhteliste niiskuste erinevus mõõdetud- ja arvutatud tulemuste vahel.



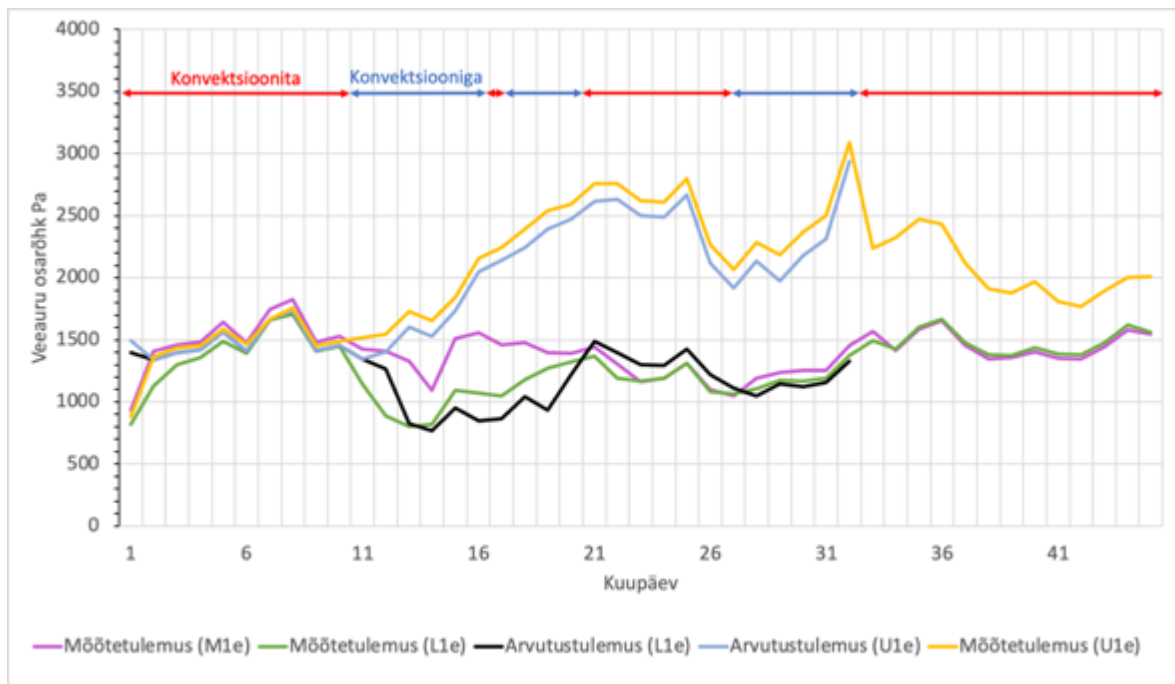
Joonis 3.31 Mõõdetud t ja RH põhjal arvutatud veeauru osarõhk punktis M3e ja arvutusmudeli t ja RH põhjal arvutatud veeauru osarõhk punktis L3e

Allolev joonis kujutab mõõdetud- ja arvutatud suhtelise niiskuse erinevust mõõteperioodil. Erinevus tulemuste vahel tuleneb peamiselt algniiskuse ebaühtlasest jaotusest. 21. päeval peatatud õhuvoolu tõttu tõusis suhteline niiskus õhuvoolu teekonna lõpus kuivamata niiskuse tõttu. 27. päeval käivitati taas õhuvool.



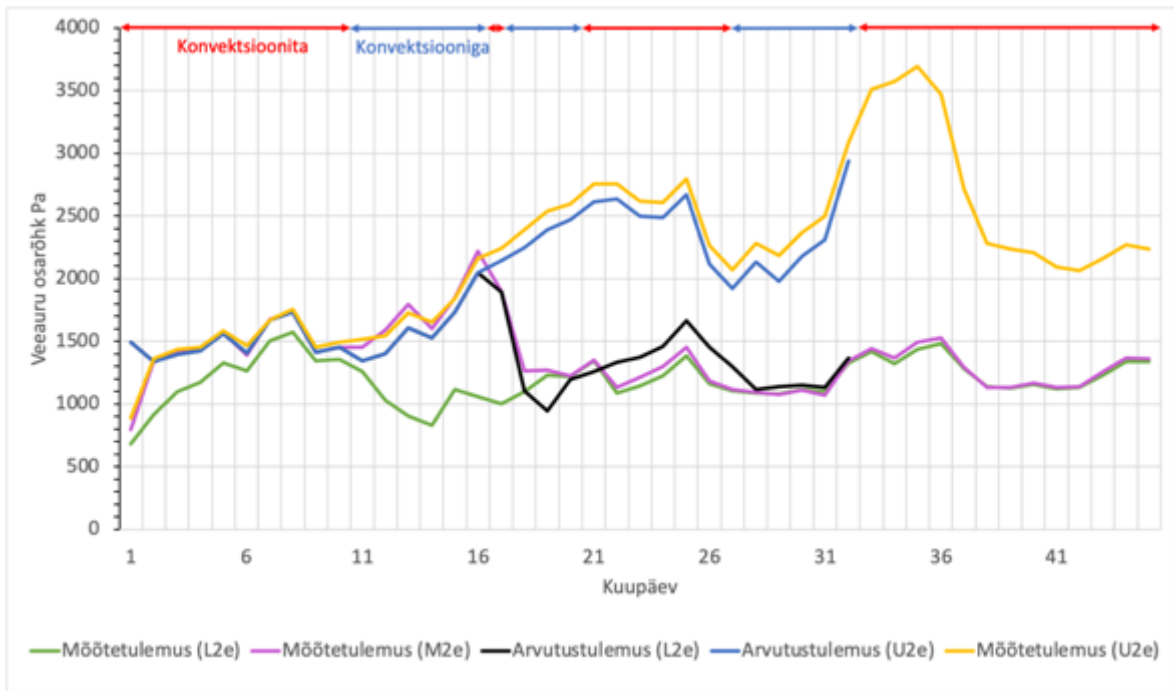
Joonis 3.32 Mõõdetud suhteline niiskus punktis M3e ja arvutusmudelis L3e

Allolev Joonis 3.33 kujutab õhu sisenemise poolse otsa veeauru osarõhkude võrdlust arvutustulemustega. Kõige standardhälve on difusiooni teel kuivava katsekeha mõõtepunkti ja arvutustulemuse vahel (vt Tabel 3.29). Madalama algniiskusega mõõtepunkt õhu sisenemise poolses otsas (L1e) ühildub arvutusmodeliga paremini kui kõrgema algniiskusega mõõtepunkt (M1e) kuna õhu sisenemise poolne ots kuivab esimesena ja kõrgema algniiskusega mõõtepunktis püsib materjali hügrooskoopsuse tõttu suhteline niiskus ja seega ka veeauru osarõhk kauem.



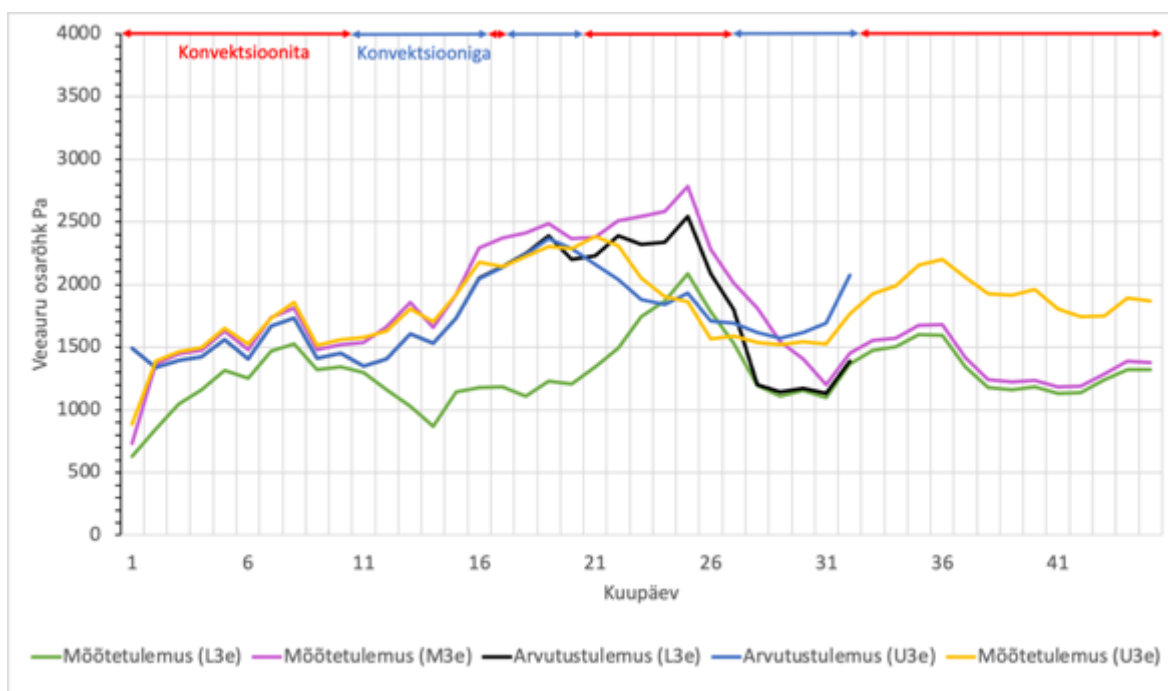
Joonis 3.33 Päeva keskmised veeauru osarõhud punktides U1e, M1e ja L1e võrrelduna arvutusmodeli tulemustega

Joonis 3.34 kirjeldab õhuvoolu teekonna keskel asuva punkti veeauru osarõhkude võrdlust arvutustulemustega. Kõige väiksem standardhälve on difusiooni teel kuivava katsekeha mõõtepunkti ja arvutustulemuse vahel (vt Tabel 3.29). Suurema algniiskusega mõõtepunkt paneeli keskel (M2e) ühildub arvutusmodeliga paremini kui väiksema algniiskusega mõõtepunkt (L2e). Paneeli alaosas liigub madalama algniiskuse tõttu kuivem õhk ning seetõttu ülehindab seal asuv mõõtepunkt kuivamise kiirust. Paneeli ülaosas asuv suurema algniiskusega punkt kuivab kauem selle ümber oleva villa suurema veesisalduse tõttu.



Joonis 3.34 Päeva keskmised veeauru osarõhud punktides U2e, M2e ja L2e võrrelduna arvutusmodeli tulemustega

Joonis 3.35 kujutab õhuvoolu teekonna lõpus asuva punkti veeauru osarõhkude võrdlust arvutustulemustega. Kõige väiksem standardhälve on difusiooni teel kuivava katsekeha mõõtepunkti ja arvutustulemuse vahel (vt Tabel 3.29). Suurema algniiskusega mõõtepunkt paneeli keskel (M3e) ühildub arvutusmodeliga paremini kui väiksema algniiskusega mõõtepunkt (L3e). Paneeli alaosas liigub madalama algniiskuse tõttu kuivem õhk ning seetõttu ülehindab seal asuv mõõtepunkt kuivamise kiirust. Kuna konvektsiooni teel kuivatatava arvutusmodeli kohaselt kuivab see punkt mõõtepunktide viimasena, siis on paneeli alaosa madala algniiskuse tõttu selles punktis (L3e) suurim veeauru osarõhu erinevus mõõtetulemustest- 19 kuivatuspäeval 1159 Pa.

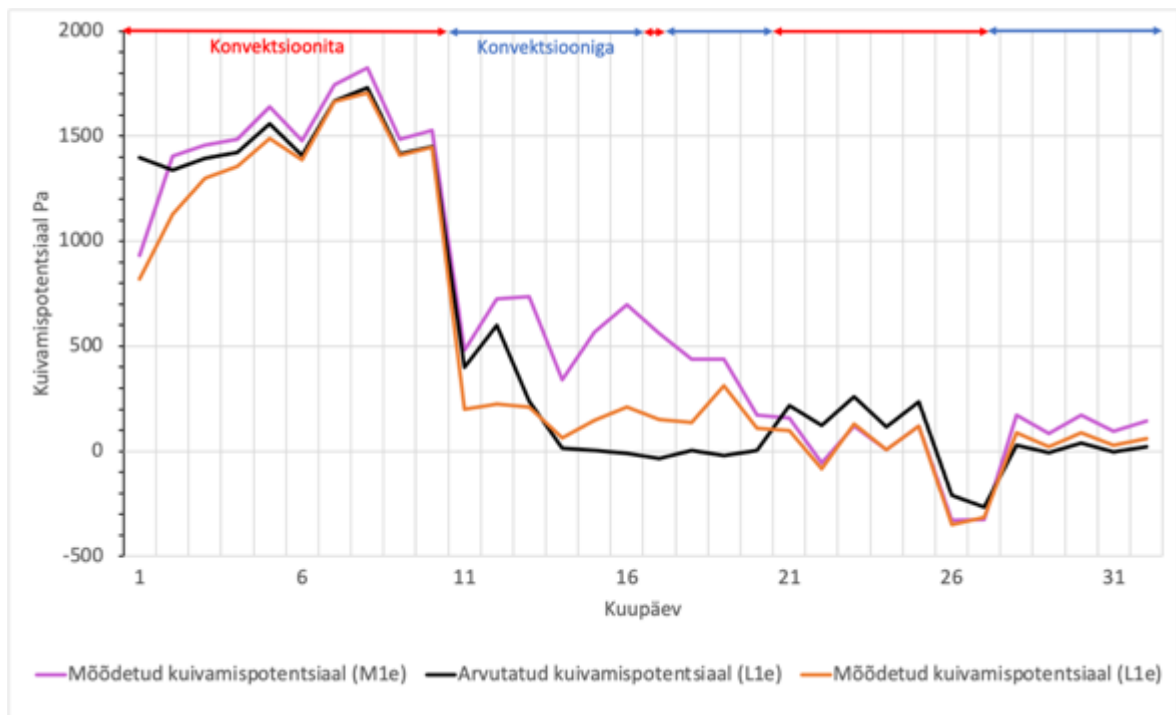


Joonis 3.35 Päeva keskmised veeauru osarõhud punktides U3e ja M3e (arvutusmudelis L3e)

Järgnevalt on esitatud mõõte- ja arvutustulemuste kuivamispotentsiaalide võrdlus paneeli keskel ja otstes, välispinna lähedal asuvates punktides, kus on suurim algniiskus (vt

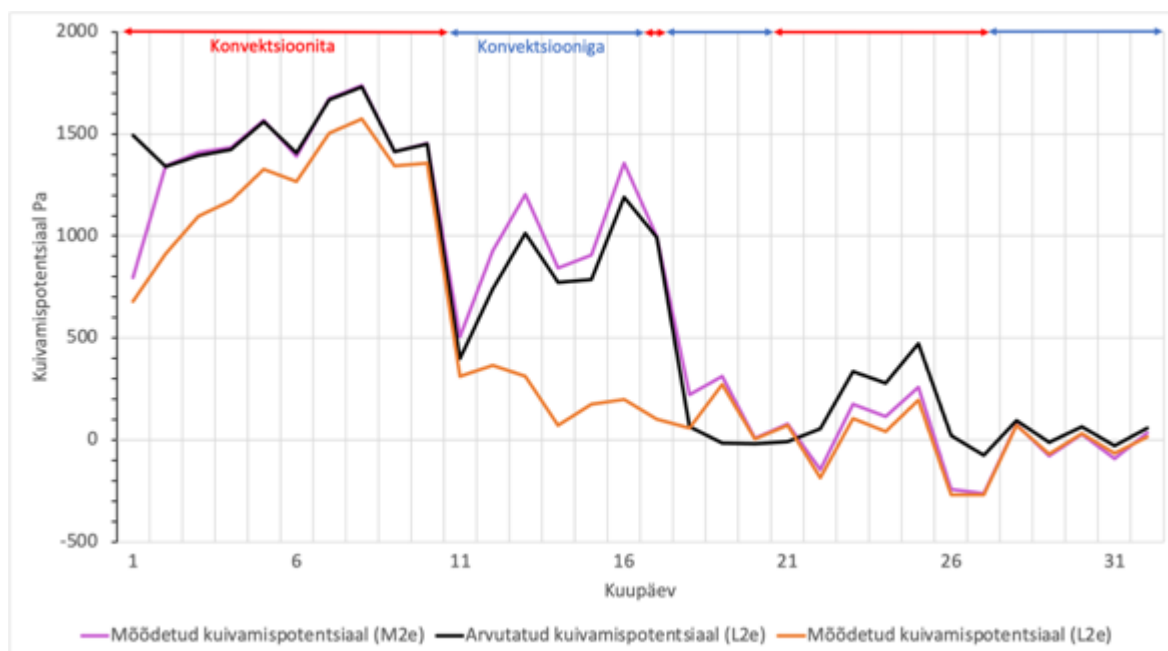
Joonis 3.36, Joonis 3.37, Joonis 3.38, Joonis 3.39, Joonis 3.40 ja Joonis 3.41). Mõõte- ja arvutustulemuste vahe tuleneb asjaolust, et arvutusmudelis on niiskus jaotatud ühtlaselt üle paneeli kõrguse, katses aga süstiti vesi kõrguslikult ühte punkti.

Õhu sisenemiskoha poolsetes punktides (algustähena "L") saavutatakse 22. kuivatuspäevaks kuivamispotentsiaal väärtusega 0, mis tähendab et selliste tingimuste korral antud punkti välisõhuga enam kuivemaks saada ei ole võimalik (vt Joonis 3.36). 26. kuivatuspäeval saavutatav negatiivne kuivamispotentsiaal, mis tähendab et täiendavat välisõhku sisse tõmmates hoopis niisutatakse seda punkti.



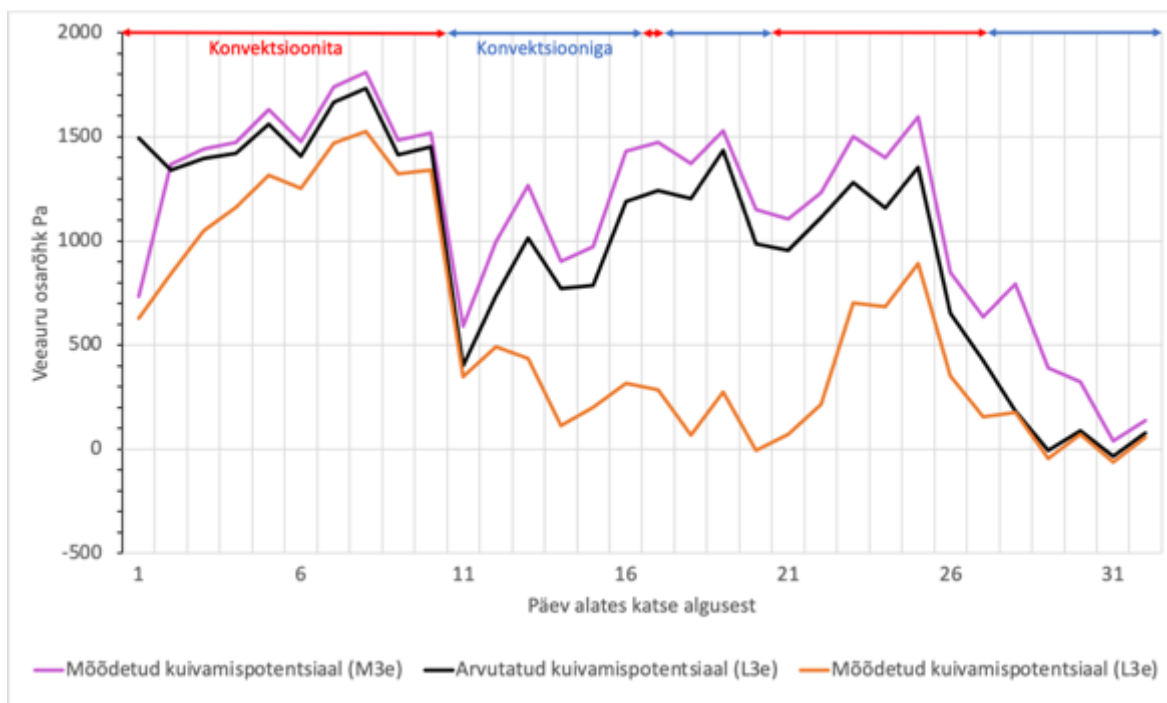
Joonis 3.36 Konvektsiooni teel kuivava katsekeha kuivamispotentsiaali mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus õhu sisenemise poolses otsas

Õhuvoolu teekonna keskel (algustähena "M") saavutatakse 20. kuivamispäevaks nullilähedane kuivamispotentsiaal, mis kõigub järgneva kuivatusperioodi vältel negatiivsete ja positiivsete väärtuste vahel. See tähendab, et 20. päeval on õhuvoolu sisenemise poolne ots kuni seina keskosani kuivanud ning kõrge niiskusega ala on seina keskosa ning õhu väljumise poolse otsa vahel (vt Joonis 3.37). Sarnaselt õhu sisenemise poolse otsaga saavutatakse paneeli keskosas 26. kuivatuspäeval negatiivne kuivamispotentsiaal, mis tähendab, et õhk ka paneeli keskosa läbib välistingimustega õhk ning vedelal kujul niiskust seal enam ei ole.



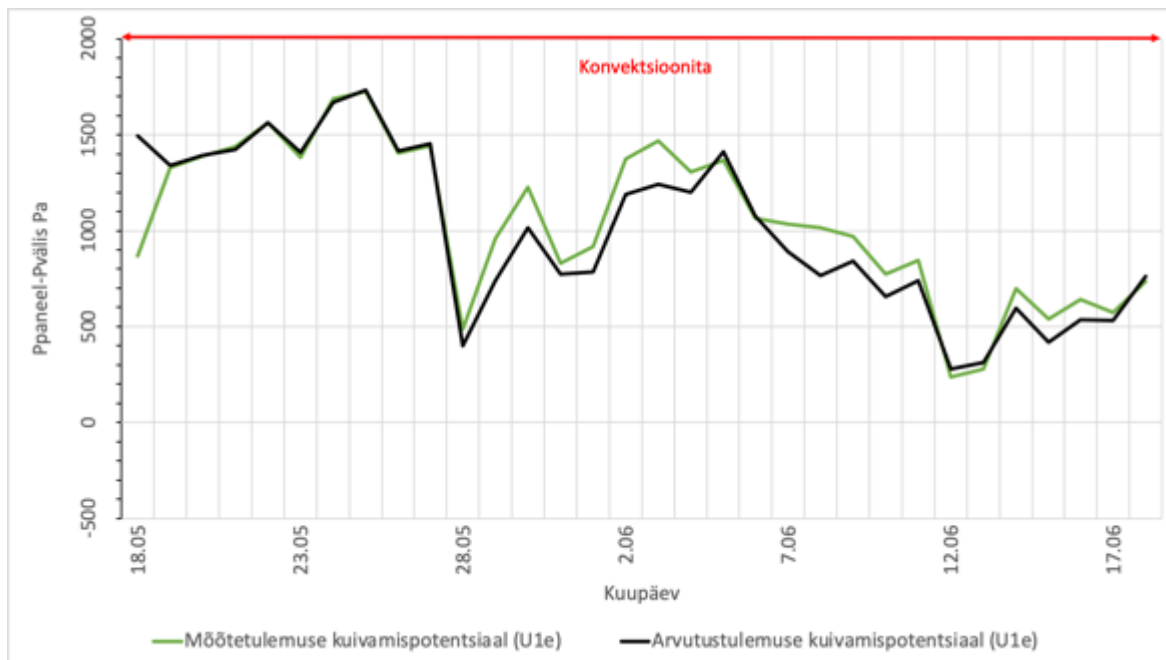
Joonis 3.37 Konvektsiooni teel kuivava katsekeha kuivamispotentsiaali mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus seina keskel

Õhu väljumise poolses otsas saavutatakse kuivamispotentsiaal 0 alles 31. kuivatuspäeval. Suurema algniiskusega mõõtepunktis (M3e) säilib ka 31. päeval kuivatuspotentsiaal 39 Pa, mis tähendab, et marginaalsel määral on antud punkti võimalik veel kuivemaks saada (vt Joonis 3.38).



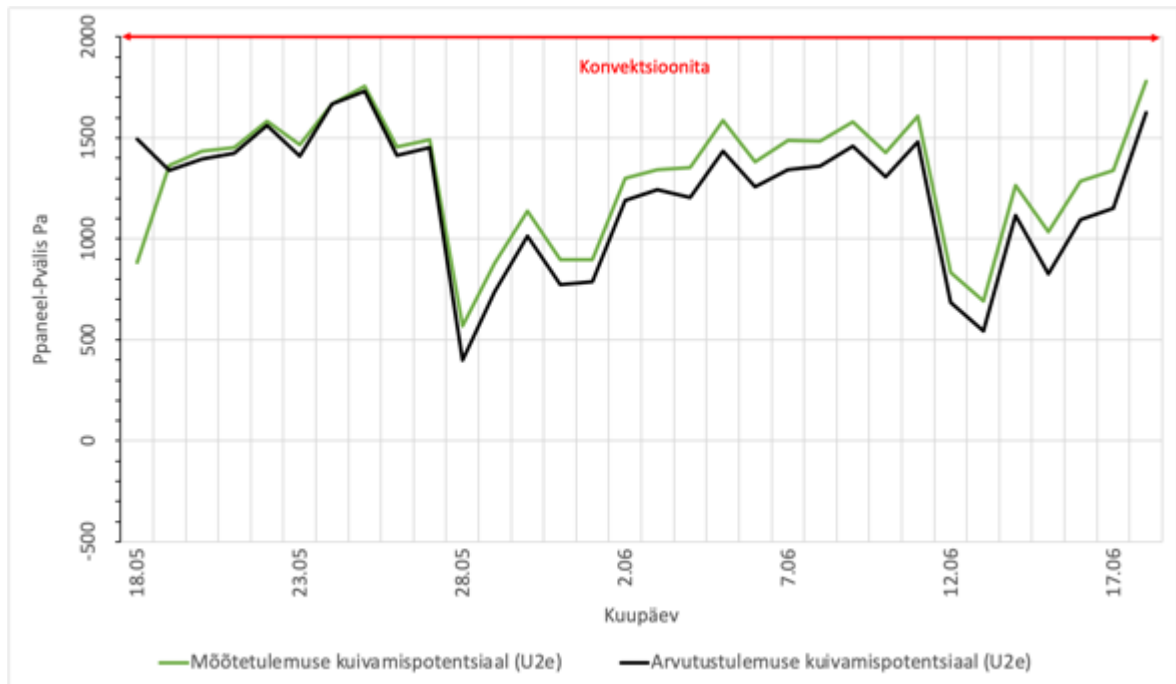
Joonis 3.38 Konvektsiooni teel kuivava katsekeha kuivamispotentsiaali mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus õhu väljumise poolses otsas

Difusiooni teel kuivava katsekeha otsmistes punktides ei saavutatud ka mõõteperioodi lõpuks kuivamispotentsiaali 0 (vt *Joonis 3.39* ja *Joonis 3.41*). Isegi kui see oleks saavutatud, siis oleks see tulnud välistingimuste järsu niiskumise arvelt, mitte villa lõpliku kuivamise tõttu. Kivivillas on lisaks pooriõhu niiskusele ka hügrokoopne niiskus.

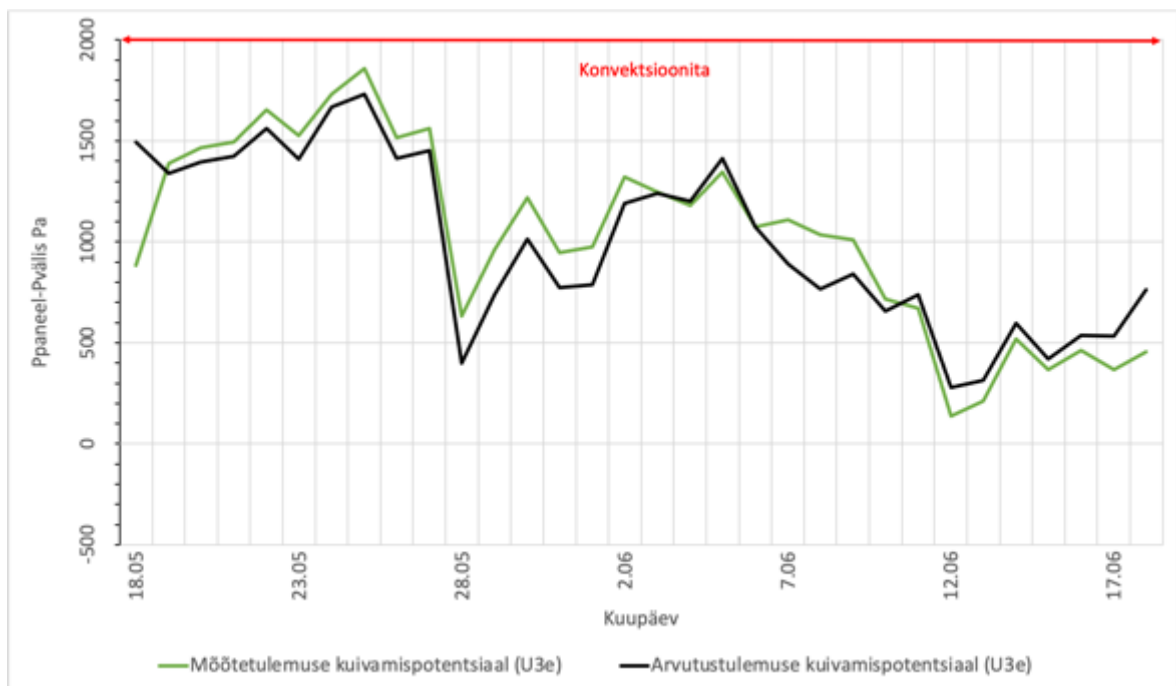


Joonis 3.39 Difusiooni teel kuivava katsekeha kuivamispotentsiaali mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus paneeli otsas

Difusiooni teel kuivava katsekeha keskel toimub kuivamispotentsiaali muutus enamjaolt välistingimuste muutuse arvelt. Tulenevalt välistemperatuuri tõusust ning sellega kaasnenud välise suhtelise niiskuse langusest oli mõõteperioodi lõpuks kuivamispotentsiaal isegi suurem kui mõõteperioodi alguses. Paneeli sees tõusis veeauru osarõhk tõusva temperatuuri tõttu kuid suhteline niiskus väljas langes ja see tõi endaga kaasa kuivamispotentsiaali tõusu (vt *Joonis 3.40*).



Joonis 3.40 Difusiooni teel kuivava katsekeha kuivamispotentsiaali mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus paneeli keskel



Joonis 3.41 Difusiooni teel kuivava katsekeha kuivamispotentsiaali mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus paneeli teises otsas

3.3 Kuivatusstrateegiad suve- ja talveperioodil

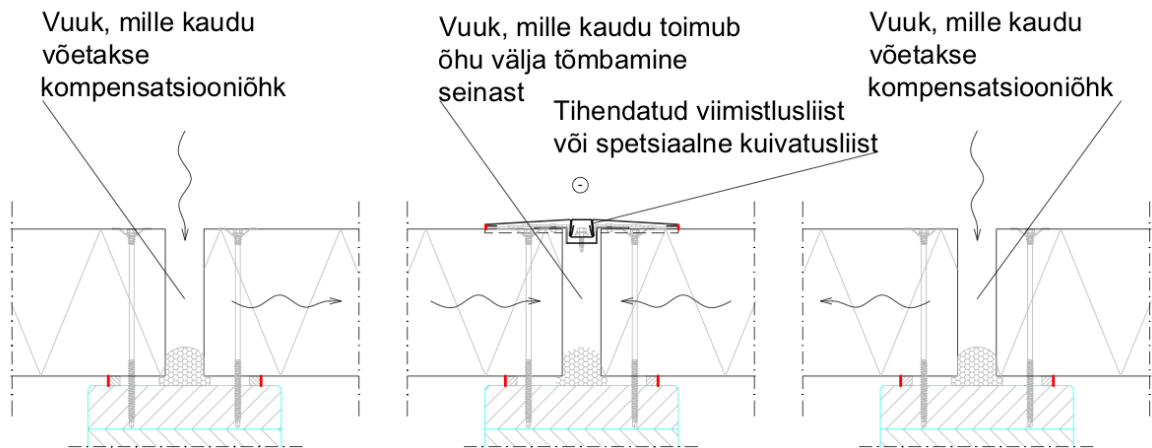
3.3.1 Realse seina kuivatamine konvektsiooni teel

Realse seina korral asetsevad ventileeritavad vertikaalvuugid ning kompensatsiooniõhu vertikaalvuugid üle ühe (vt *Joonis 3.42* ja *Joonis 3.43*). Erilist tähelepanu tuleb pöörata paneelide vaheliste liitekohtade, üla ja alaserva ning ventileeritava vuugi õhutihedusele (joonistel märgitud punasega, lisaks on õhulekke ohtlikud redelite kinnituskohad, aknaavade ümbrused jms). Vastasel korral tekib olukord, kus suurem osa kompensatsiooniõhust ammutatakse läbi väikseima õhuvoolutakistusega teekonna, mitte ette nähtud vertikaalvuukidest, mis asuvad ventileeritavate vertikaalvuukide kõrval. Vaakumpump ühendatakse tihendatud vuugipleki otsa külge (vt *Joonis 3.44*).



Joonis 3.42 Ventileeritava seina vaade. Nooltega on tähistatud õhu liikumise suund paneelis kompensatsiooniõhu vuugist ventileeritava vuugini

Lõige 1-1



Joonis 3.43 Ventileeritava seina horisontaallõige. Nooltega on tähistatud õhu liikumine kompensatsiooniõhu vuukidest ventileeritava vuugini



Joonis 3.44 Vuugiplekk, mille otsa ühendatakse vaakumpump. Vuugipleki tihendamine on oluline, et vältida kompensatsiooniõhu võtmist ventileeritava vuugi juurest, ilma paneeli läbimata.

Energiatõhusam variant on kuivatada seinu suveperioodil, tõmmates seinu sisse läbi kompressori töödeldud õhku. Sel juhul ei ole tarvis kütta paneeli sisse tõmmatavat õhku ning tarvilikud õhuvoolud sama kuivatuskestuse saavutamiseks on üle 100 korra (oleneb seinu geomeetriast) väiksemad kui talveperioodil (vt *Joonis 3.45* ja *Joonis 3.46*). Välisõhu tõmbamisel kompressorisse suurendatakse selle õhu rõhku 1 atm pealt 10 atm peale. Seeläbi väheneb õhu ruumala ning üleliigne niiskus pressitakse õhust välja. Eeldusel, et õhu temperatuur jääb samaks kuid ruumala pressitakse 10 korda kokku võib võtta kompressoriõhu niiskussisalduseks kümnendiku välisõhu niiskussisaldusest. Selline õhu töötlemine kompressoriga keskmistatud suvetingimuste korral annab õhu veeauru sisalduseks 3,3 korda väiksema väärtuse kui keskmistatud talvise õhu veeauru sisaldus (123 Pa vs 410 Pa). Järgnevalt toodud arvutuslikud kuivatusvariandid on arvatud seinu kohta, mille mõõtmed on 8 x 6 x 0,23 m.

3.3.2 Kuivatusvariant 1- Talvel soojendatud õhuga

Õhu soojendamiseks kuluv energiahulk sõltub välisõhu entalpiast, soojendatavast õhuvooluhulgast, nõutavast temperatuurist õhu sisenemisel paneeli ning soojuskadudest enne õhu sisenemist villa. Järgnevas arvutuses hülgame soojuskaod ning käsitleme ainult õhu soojendamiseks kuluvat energiat [8]. Olgu meil talvehooajale keskmistatud tingimustega välisõhk temperatuuriga $t = -4,4$ C ja $RH = 93\%$ ning tihedusega $\rho_{\text{air}} = 1,32$ kg/m³ ning 1 kuivatatav sein mõõtmetega 8 x 6 x 0,23 m.

$$P_{\text{Vapour}} = 610,78 * e^{(t*17.2694/(t+238.3))} * RH/100 = 410 \text{ Pa} \quad (\text{V4.1})$$

Järgnevalt leiame veeauru sisalduse õhus ühikuga kg/kg.

$$W_{\text{Vapour}} = 0.002166 * P_{\text{Vapour}}/(t + 273.13) * \rho_{\text{air}} = 0,00251 \text{ kg/kg} \quad (\text{V4.2})$$

Teades soovitud õhu temperatuuri on võimalik välja arvutada entalpia kasv kilogrammi soojendatava õhu kohta. Võtame allolevas arvutuses soovitud õhu pealevoolu temperatuuriks $t = 40^\circ$ C ehk $\Delta t = 44,4^\circ$ C. Antud temperatuuri korral võib kuiva õhu soojusmahtuvuseks C_p lugeda 1,007 kJ/(kg*K) ja veeauru soojusmahtuvuseks C_{vap} 1,84 kJ/(kg*K). Seega niiske õhu entalpia tõus temperatuuri kasvu 44,4° C kohta avaldub:

$$H_{\text{Moistair}} = (C_p * \Delta t - 0,026) + W_{\text{Vapour}} * C_{\text{vap}} * \Delta t = 44,89 \text{ kJ/kg} \quad (\text{V4.3})$$

Määratud õhuvoolu korral on võimalik arvutada läbi seina tõmmatava õhu temperatuuri tagamiseks vajatav küttevõimsus. Olgu meil õhuvool suurusega $Q = 40330$ l/min. Korrutades õhuvoolu läbi õhu tihedusega ning ühikuid teisendades saame selle ekvivalendiks õhuvoolu 0,887 kg/s. Korrutades entalpia tõusu õhuvooluga saame antud temperatuuriga õhuvoolu tagamiseks vajatava küttevõimsuse:

$$P_{\text{Airheating}} = H_{\text{Moistair}} * Q * \rho_{\text{air}} = 39,83 \text{ kW} \quad (\text{V4.4})$$

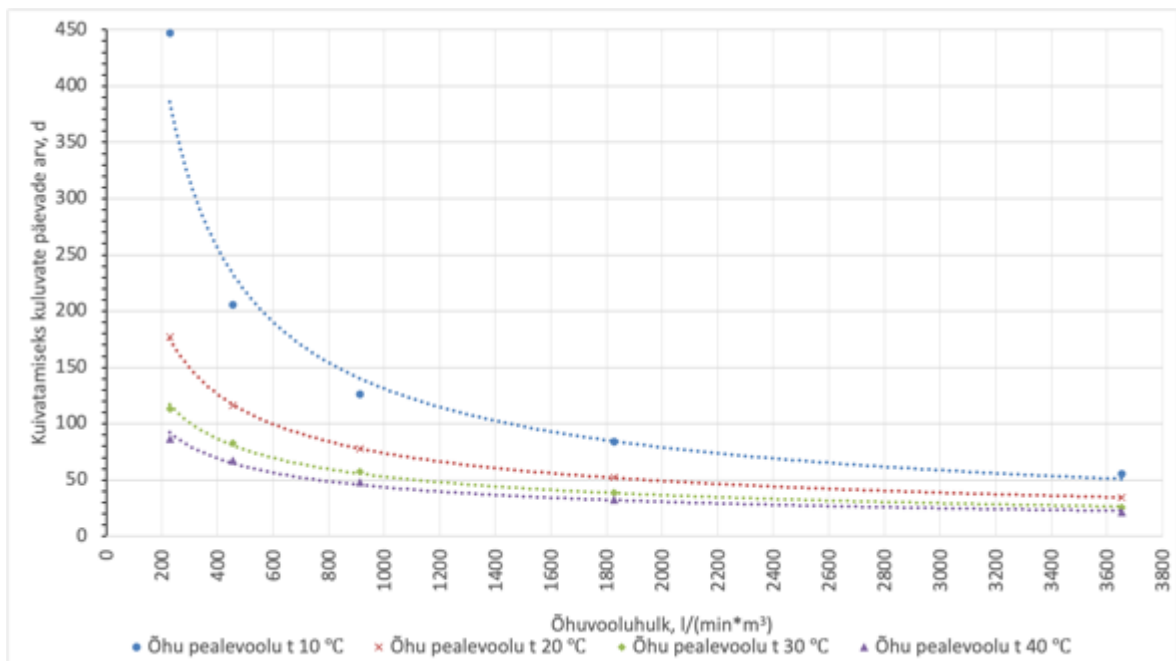
Arvutusmudelis, mille niiskussisaldus on 2,28 l/m³ võtab selliste tingimustega seina kuivamine aega 21 päeva ja 14 tundi. Seega vajatav energia õhu soojendamiseks testseina kuivatamisel:

$$E_{\text{Heat}} = P_{\text{Airheating}} * 518 = 20631 \text{ kW} * \text{h} \quad (\text{V4.5})$$

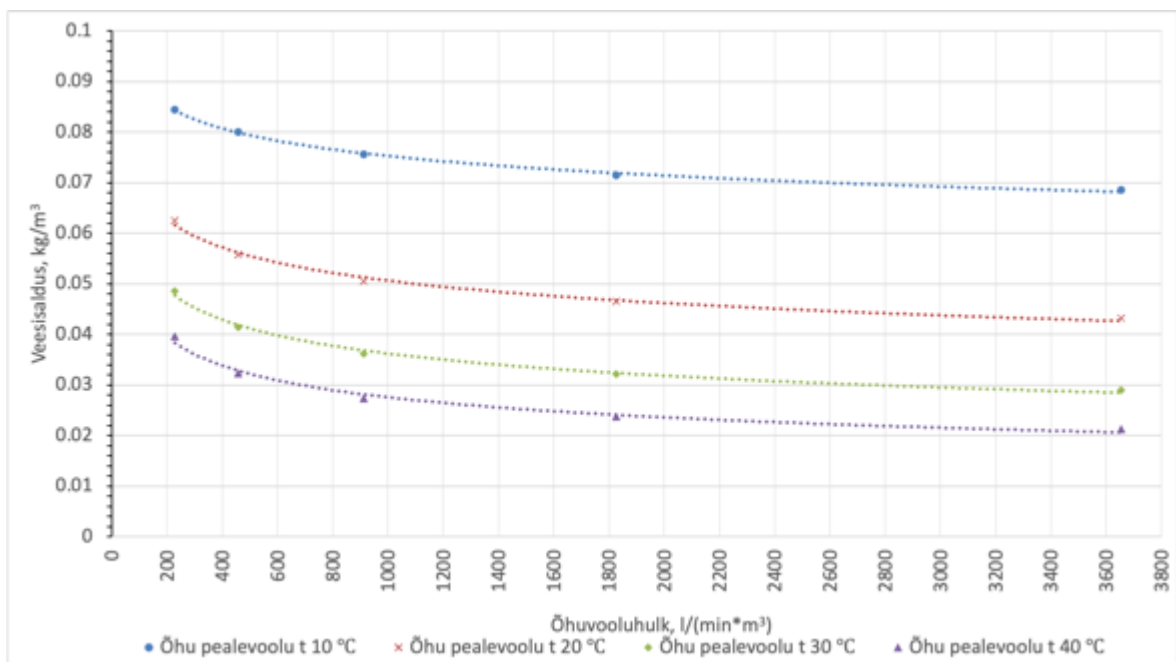
Arvestades elektrienergia hinnaks 5,94 senti/Kwh (19.07.2021 kell 10.30 seisuga Eesti Energia AS kindla paketi hind), lisades sellele elektriaktsiisi 1€/Mwh ning elektrilevi ööpäeva keskmise võrgutasu 0,0487 €/kWh saame õhu kütmise hinnaks kuivatusperioodi vältel ca 2250 € mis teeb seina mahtu arvestades 204 €/m³.

Eeldusel, et seinad soovitakse kuivatada 21 päeva jooksul talvel (õhuvooluhulk 3653 l/(min*m³) ja õhu pealevoolu temperatuur +40° C) on kuivatusmeetodi rahakulu õhu

soojendamisele on 204 €/m³. Sellele lisandub veel kulu soojuskadudele õhu soojendamisel ning kulu pumba tööshoidmiseks õhuvoolu tagamisel. Kui võtta lihtsutatult, et soojuskadude, pumpade rendi, pumpade tööshoidmise jms rahakulu on samaväärne õhu soojendamise rahakuluga seina kuupmeetrite kohta, siis maksaks 150 mm paksuste, 8 m kõrguste seinte kuivatamine $(2 \cdot 204) \cdot 0,15 \cdot 8 = 489$ €/jm. Kui võtta ristkülikulise hoone küljepikkusteks 40 x 80 m siis maksaks kogu hoone seinte kuivatus $489 \cdot 240 = 117\,391$ €. Kui seinu soovitakse kuivatada 32 päeva jooksul, ehk 2 korda väiksema õhuvooluhulga juures (õhuvooluhulk 1827 l/(min*m³) ja õhu pealevoolu temperatuur +40° C) siis on rahakulu õhu soojendamisele $204/2 \cdot 32/21 = 155$ €/m³. Kui eeldada, et lisanduv kulu pumpade tööshoidmiseks, varustuse rendiks jms jääb seina kuupmeetrite kohta samaks, siis maksab kogu hoone kuivatus 32 päeva jooksul $(204+155) \cdot 0,15 \cdot 8 = 430$ €/jm ehk $430 \cdot 240 = 103\,416$ €. Kui vähendada õhuvoolu veel 2 korda (õhuvooluhulk 913 l/(min*m³) ja õhu pealevoolu temperatuur +40° C) siis on kuivamise kestuseks 48 päeva. Eeldades, et lisanduv kulu pumpade tööshoidmiseks, varustuse jms jaoks ei muutu ning on endiselt 204 €/m³ saame kogu hoone kuivatuse maksumuseks 48 päeva jooksul $(155/2 \cdot 48/32 + 204) \cdot 0,15 \cdot 8 = 384$ €/jm ehk sama geomeetria puhul 92 236 €. Sarnast arvutust jätkates saame õhuvooluhulga 457 l/(min*m³) korral kuivatamise maksumuseks 342 €/jm ehk 82 104 € kuivatusperioodi kestusega 67 päeva. Õhuvooluhulga 228 l/(min*m³) korral kuivatamise maksumuseks 308 €/jm ehk 73 894 € kuivatusperioodi kestusega 87 päeva. Õhuvoolu vähendamine toob kaasa suurema lõppniiskuse peale kuivatusperioodi lõppu (vt *Joonis 3.46*). Seega aitab kivivilla õige ladustamine ning niiskuse eest kaitsmine maandada oluliselt rahalist riski. Allpool on toodud seina lõpliku kuivamise kiirused ja lõplikud niiskuse kogused peale lõpliku kuivamise aega (vt *Joonis 3.45* ja *Joonis 3.46*). Arvutused on tehtud püsivate talvehooaja keskmistatud ääretingimustega ega arvesta kulu soojuskadudele ega õhuvoolu tagamisele.



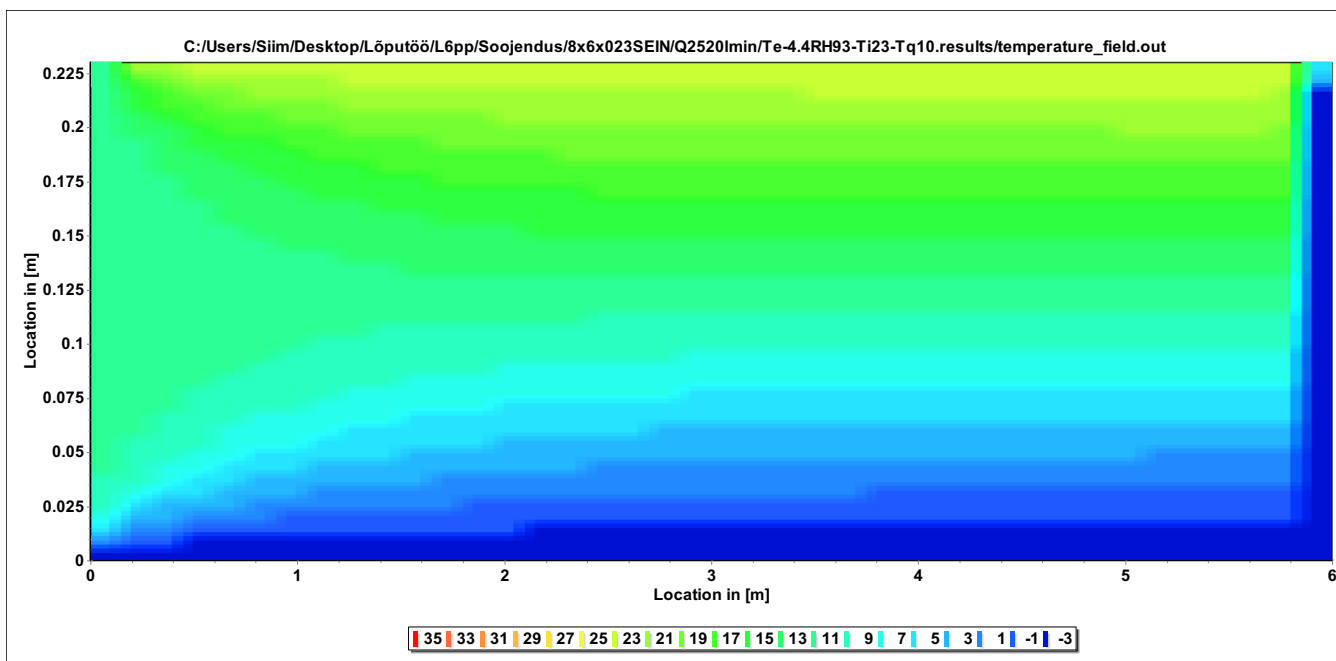
Joonis 3.45 Niiskussisalduse 2,28 kg/m³ pealt lõplikule tasemele (vt Joonis 4.2) kuivatamiseks kuluvate päevade arv statsionaarolukorras erinevate õhuvooluhulkade ja õhu pealevoolu temperatuuride korral talvehoajal



Joonis 3.46 Lõplik niiskussisaldus antud mõõtmega seinas statsionaarolukorras erinevate õhuvooluhulkade ja õhu pealevoolu temperatuuride korral talvehoajal

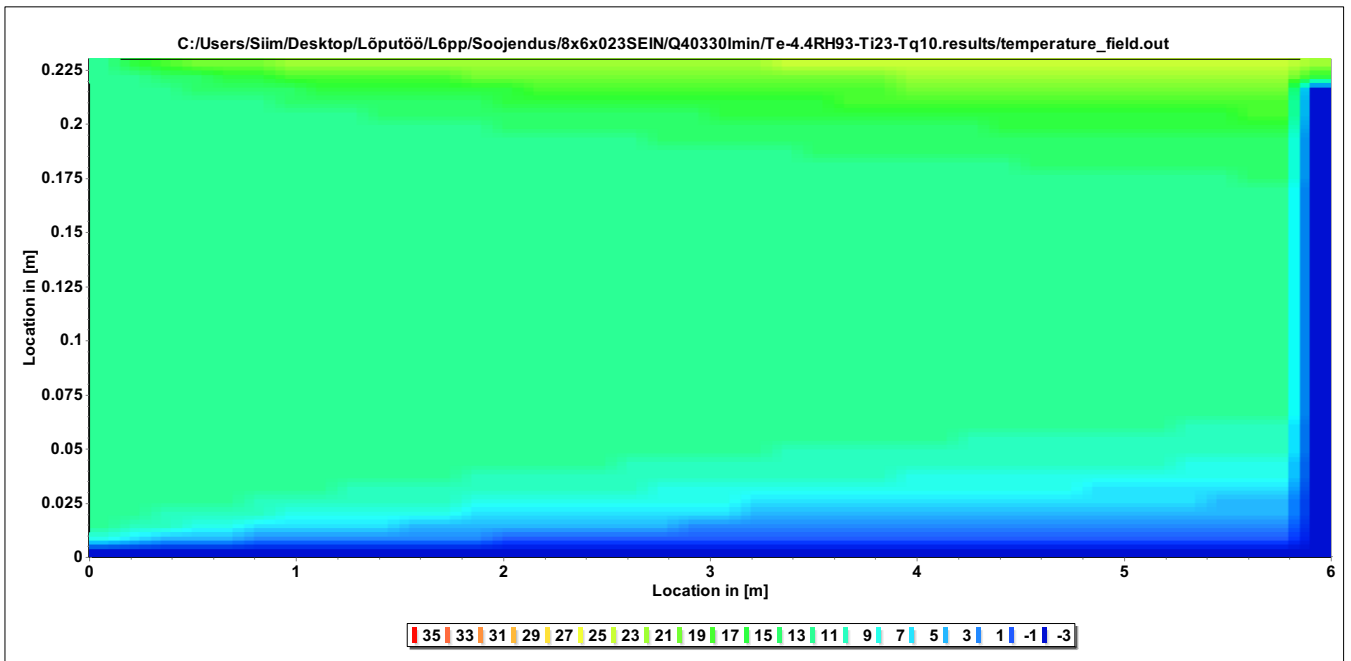
Nähtub, et mida soojemat õhku paneeli tõmmata, seda kiirem on kuivamisprotsess. Sama oluline on õhuvooluhulk. Kui tõmmata paneeli väga sooja õhku väga väikese õhuvooluhulgaga siis soojendab üles köetud õhk ainult lühikest osa kogu õhuvoolu teekonnast (Vt *Joonis 3.47*, *Joonis 3.48*, *Joonis 3.49* ja *Joonis 3.50*) ning õhu kütmise mõju kuivatamisele hääbub soojuskadude tõttu läbi ääritingimuste.

Joonis 3.47 kujutab tekkivat temperatuurigradiendi madala õhu pealevoolu temperatuuri ning võrdlemisi madala õhuvooluhulga korral. Kuna paneeli sisene temperatuur on madal, siis on ka pooriõhu veeauru osarõhk madal, mis tähendab pikka kuivamise kestust. Tulenevalt kõrgest suhtelisest niiskusest on valdav osa niiskumassist kogunenud vahetult külma pinna lähedale ning kiire õhuvoolu läbi liigutamine ei aita olulisel määral kuivatamisele kaasa (vt *Joonis 3.45* ja *Joonis 3.46*).



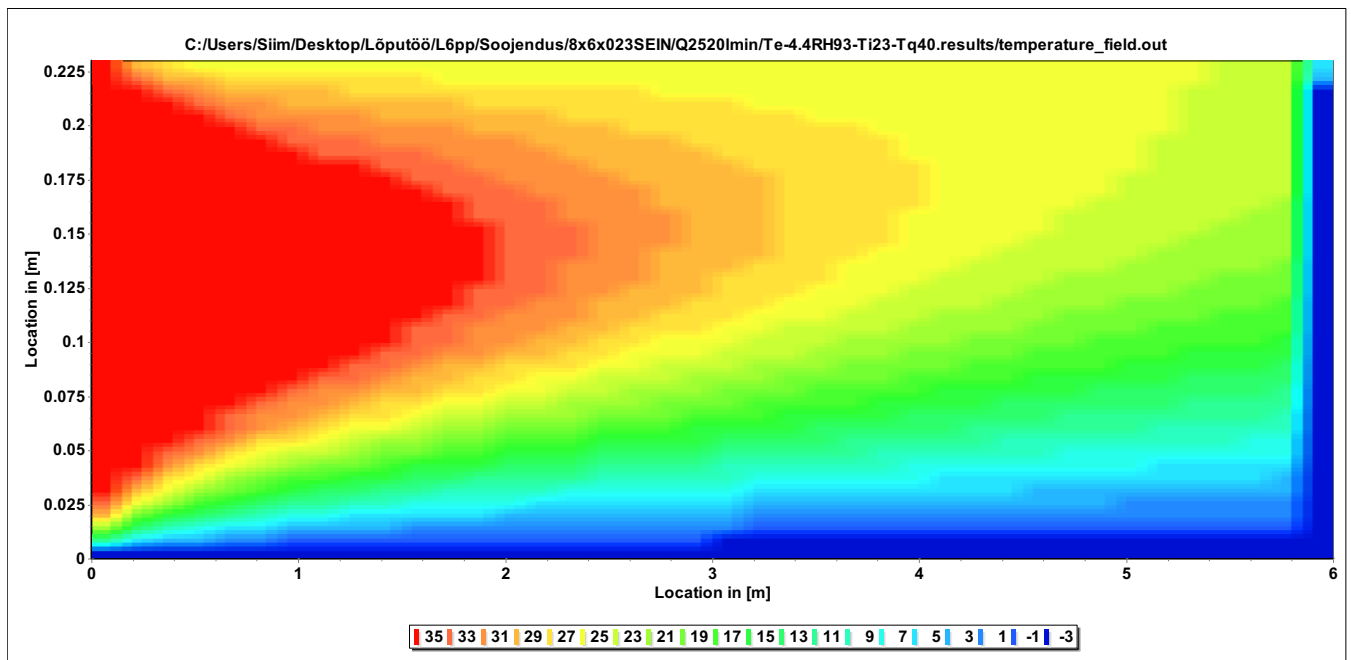
Joonis 3.47 Statsionaarolukorras välja kujunev temperatuurigradiend talvehooajal õhuvoolu 2520 l/min (228 l/min/m^3) ja õhuvoolu temperatuuri $+10^\circ \text{C}$ korral.

Joonis 3.48 kujutab tekkivat temperatuurigradiendi võrdlemisi madala õhu pealevoolu temperatuuri ning suure õhuvooluhulga korral. Võrreldes madalama õhuvooluhulgaga kuivatamisega on paneeli sisene keskmine temperatuur tõusnud, kuid temperatuur välispinna lähedal (kuhu on kogunenud suurem osa niiskumassist) on endiselt madal. Seetõttu on suure niiskusega külm ala muutnud kitsamaks, kuid niiskuse liikumine soojemasse alasse on tõkestatud veeauru osarõhu ühtluse tõttu üle paneeli). Tekib olukord, kus soojendatud õhuga alas on madal suhteline, niiskus ning külma pinna lähedal on kõrge suhteline niiskus, kuid kuivamispotentsiaal on 0 ja edasist kuivamist ena ei toimu. (vt *Joonis 3.45* ja *Joonis 3.46*).



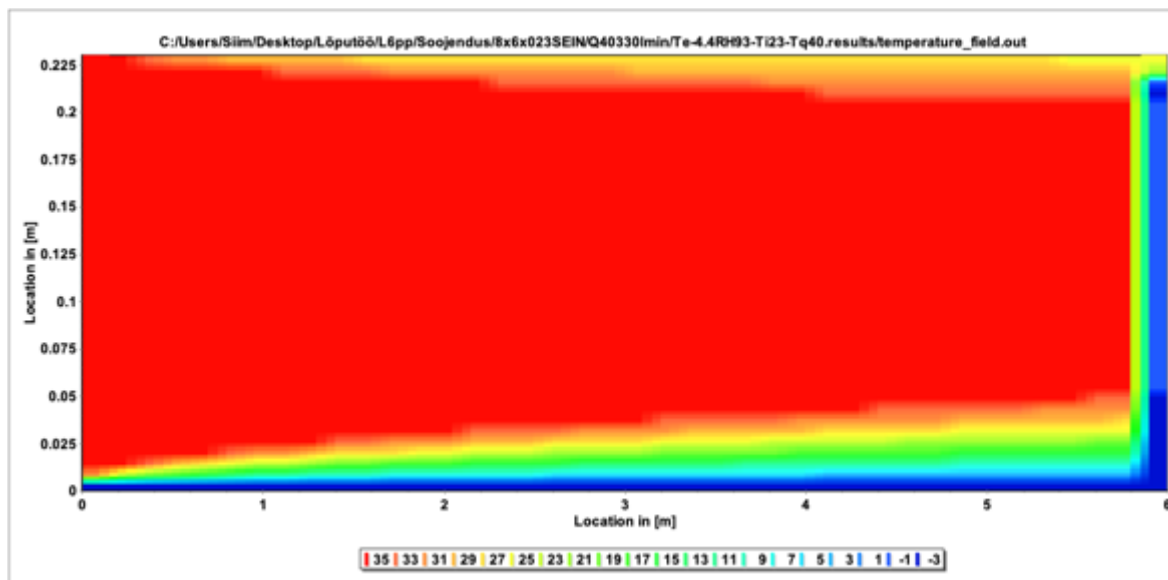
Joonis 3.48 Statsionaarolukorras välja kujunev temperatuurigradient talvehooajal õhuvoolu 40330 l/min (3653 l/min/m^3) ja õhuvoolu temperatuuri $+10^\circ \text{C}$ korral.

Joonis 3.49 kujutab tekkivat temperatuurigradienti võrdlemisi kõrge õhu pealevoolu temperatuuri ning väikese õhuvooluhulga korral. Antud juhul kestab kuivamine kauem kui eelmise variandi puhul, kuid lõplik saavutatav niiskustase on madalam (vt Joonis 3.45 ja Joonis 3.46). Õhuvool jahtub lähtepunktist kaugemal kuid üles soojendatav ala ja keskmine temperatuur paneelis on suuremad kui madala temperatuuri korral.



Joonis 3.49 Statsionaarolukorras välja kujunev temperatuurigradient talvehooajal õhuvoolu 2520 l/min (228 l/min/m^3) ja õhuvoolu temperatuuri $+40^\circ \text{C}$ korral

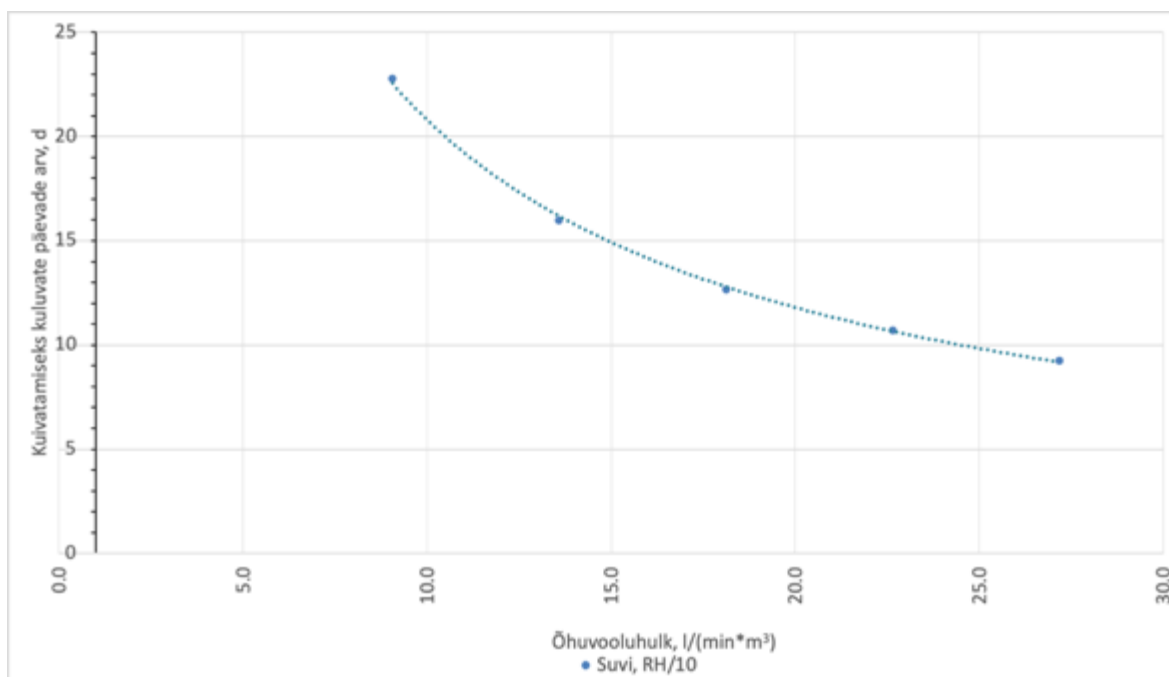
Joonis 3.50 kirjeldab tekkinud temperatuurigradienti suure õhu peaveoolu temperatuuri ja suure õhuvooluhulga korral. Võrreldes eelmiste variantidega on üles soojendatav ala suurem ning vähem niiskust on kogunenud välispinna lähedal asuvasse külma alasse. Kui soojendada ka vahetult välistingimustega kontaktis olev pind üles (nt täiendav ajutine soojustus) siis oleks võimalik saavutada veel madalam lõplik niiskustase (vt *Joonis 3.45* ja *Joonis 3.46*).



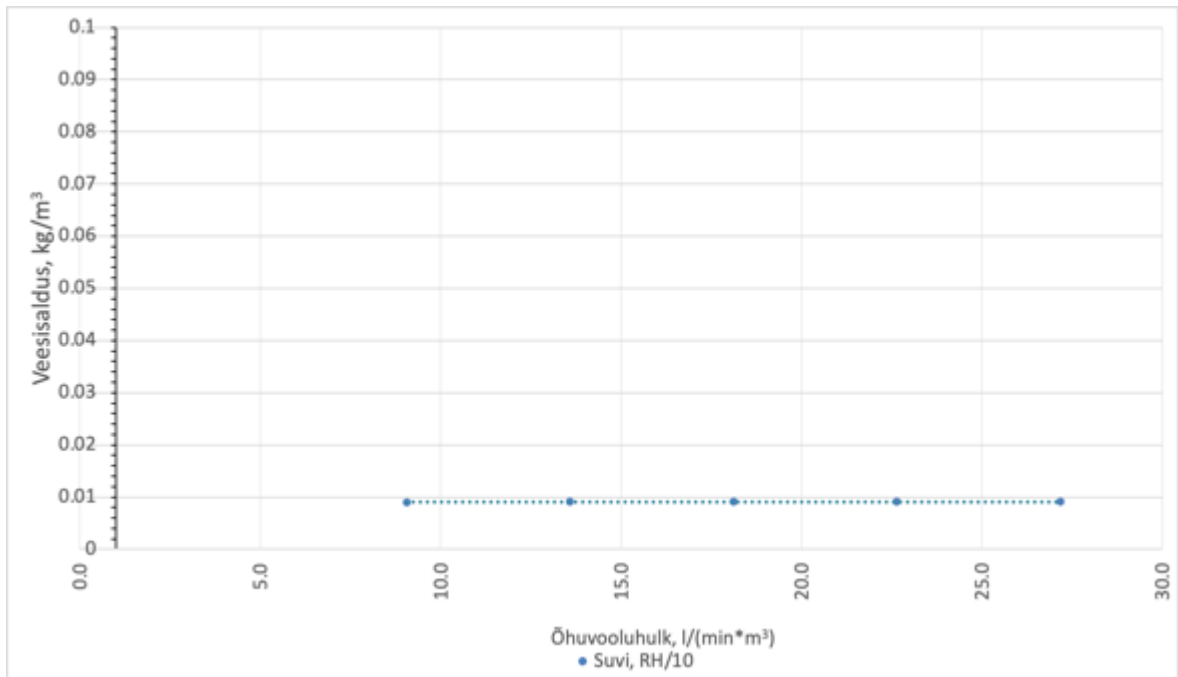
Joonis 3.50 Statsionaarolukorras välja kujunev temperatuurigradient talvehooajal õhuvoolu 40330 l/min (3652 l/min/m³) ja õhuvoolu temperatuuri +40° C korral.

3.3.3 Kuivatusvariant 2- Suvel kompressori õhuga

Suvehooaja absoluutselt niiskem õhk talvehooaja õhust tingib olukorra, kus suvine kuivatus tagab kivivilla madala suhtelise niiskuse madala temperatuurigradiendi korral. Temperatuurigradiendi tõustes toimub niiskuse kogunemine külmema pinna lähedale. Et vältida kõrge suhtelise niiskuse teket aastaringiselt, on parim variant kuivatada seina minimaalse temperatuurigradiendiga perioodil läbi kompressori töödeldud õhuga. Selline olukord minimaliseerib vedela niiskuse kogunemise külma pinna lähedale ning võimaldab kuivatada seina minimaalse energiakuluga ja oluliselt väiksema õhuvooluga kui talvel. Olgu meil suvehooaja keskmistatud tingimustega välisõhk $t = 14,5\text{ C}$ ja $RH = 75\%$. Kui õhku töödelda läbi kompressori selle ruumala 10 korda kokku surudes võime kasutada $RH = 7,5\%$. Allpool on toodud seina lõpliku kuivamise kiirused ja lõplikud niiskuse kogused peale lõpliku kuivamise aega (Vt joonis 4.7 ja joonis 4.8). Arvutused on tehtud püsivate suvehooaja keskmistatud ääritingimustega.



Joonis 3.51 Niiskussisalduse $2,28\text{ kg}/m^3$ pealt lõplikule tasemele (vt Joonis 4.8) kuivatamiseks kuluvate päevade arv statsionaarolukorras erinevate õhuvooluhulkade korral suvehooajal, õhk töödeldud läbi kompressori

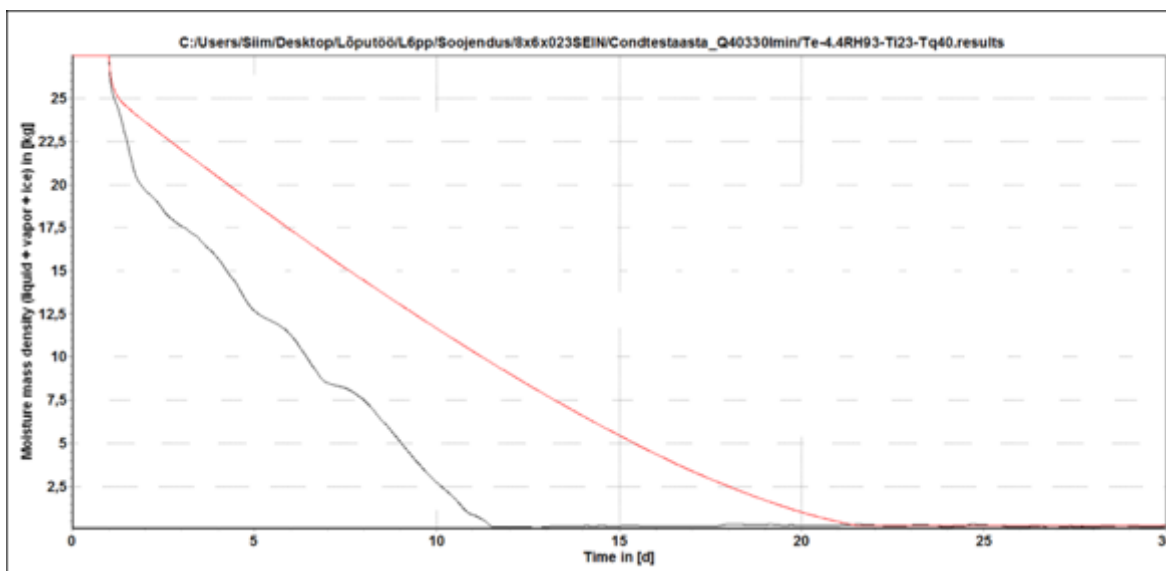


Joonis 3.52 Lõplik niiskussisaldus antud mõõtmega seinas statsionaarolukorras erinevate õhuvooluhulkade korral talvehooajal, õhk töödeldud läbi kompressori

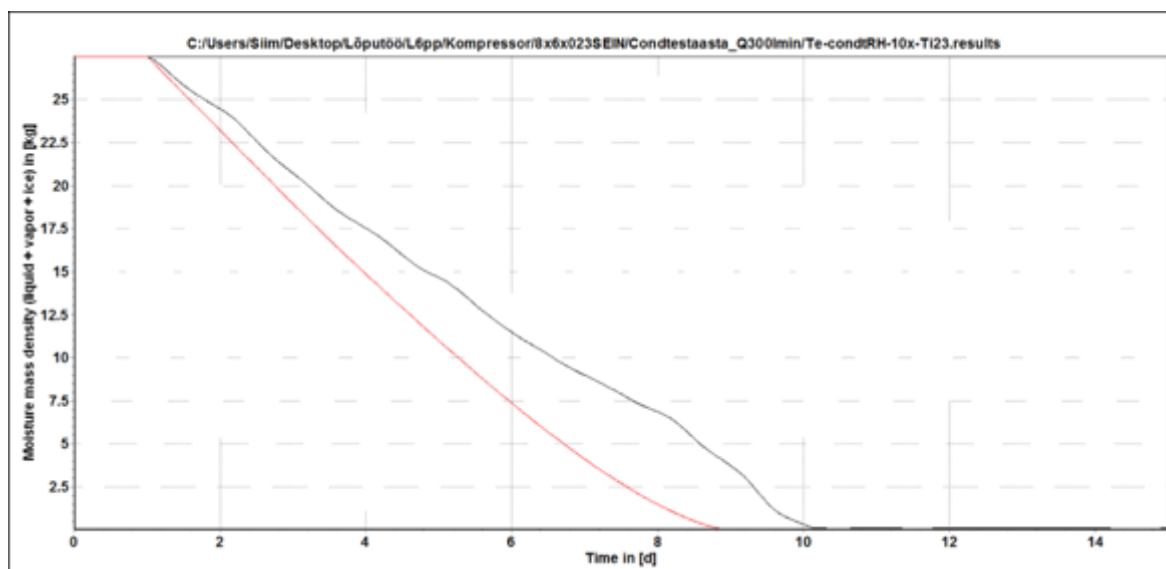
Suvehooajal mõjutab õhuvoolu kiirus vaid kuivatamise kiirust ega mõjuta lõpliku niiskussisaldust. Samuti on tarvilikud õhuvoolud kordades väiksemad talvehooajal vajalikest, mis võimaldab kulutada vähem energiat testseina kuivatamiseks ja seeläbi raha säästa.

3.3.4 Kuivatusvariandid 1995-1996 kondensaadi testaasta kliimaga

Võrdluses statsionaarolukorraga on allpool toodud niiskusmassi vähenemine dünaamilises olukorras 1995-1996 testaasta Väike-Maarja kliimaandmete ääritingimustega. Testaastast valiti talviseks kuivatuseks periood (päev 326-356), mille keskmine temperatuur on $-4,4^{\circ}\text{C}$ ning suhteline niiskus 87,2% (statsionaarolukorras $-4,4^{\circ}\text{C}$ ja suhteline niiskus 93%) . Suviseks kuivatuseks läbi kompressori valiti periood (päev 143-158), mille keskmine temperatuur on $14,2^{\circ}\text{C}$ ning keskmine suhteline niiskus 77,4 % (statsionaarolukorras $14,5^{\circ}\text{C}$ ja suhteline niiskus 75%) . Järgnevalt on toodud niiskusmassi vähenemise graafikud talvel ja suvel statsionaar- ja dünaamilise testaasta ääritingimustega (vt joonis 3.53 ja joonis 3.54)



Joonis 3.53 Statsionaarsete ja dünaamiliste ääritingimustega kuivamise võrdlus talvehooajal. Õhuvooluhulk 40330 l/min (3652 l/min/m^3) ja õhu pealevoolu temperatuur 40°C



Joonis 3.54 statsionaarsete ja dünaamiliste ääritingimustega kuivamise võrdlus suvehooajal. Õhuvooluhulk 300 l/min (27 l/min/m³), õhu suhtelist niiskust vähendatud 10x.

Talveperioodi statsionaarsete ja dünaamiliste ääritingimuste võrdluses ilmneb, et dünaamilises olukorras on kuivamine kiirem. Selle põhjuseks on kõrged päevased välistemperatuurid, mis võimaldavad ka vahetult külma pinna ääres kondenseerunud niiskusel efektiivsemalt liikuda ja paneeli keskosasse kiiremini ümber jaguneda. Õised keskmisest madalamad temperatuurid kuivamist oluliselt ei aeglusta kuna 40 kraadine kiire õhuvool läbi seinu kütab suurema osa seinast soojaks. Külma ala tekib vaid vahetult välispinna lähedal. (vt joonis 4.6). Antud geomeetria ja ääritingimuste puhul on dünaamiline kuivamine ligikaudu poole kiirem kui püsivate hooajale keskmistatud ääritingimuste korral.

Võrreldes talveperioodiga on suveperioodi keskmistatud välistemperatuur lähedasem sisetemperatuurile, mistõttu tekkiv niiskusgradient on madalam ning kuivamine on kiirem veeauru ühtlasema jaotuse tõttu üle paneeli paksuse. Suveperioodi dünaamilises protsessis keskmisest madalamate temperatuuride korral suureneb niiskusgradient, mis tähendab, et võrreldes statsionaarolukorraga liigub täiendav veeaur vedelasse faasi. Keskmisest kõrgemate temperatuuride korral toimub vedela vee liikumine gaasilisse faasi, mis võtab rohkem aega kui üleminek gaasilisest faasist vedelasse ning seetõttu on kuivamine kohati aeglasem. Talveperioodil sarnast nähtust ei teki kuna valdav osa seinast välispinnast eemal on üles köetud kuuma ja kuiva õhuga. Antud geomeetria ja ääritingimuste puhul on dünaamiline kuivamine ligikaudu 15% pikem kui statsionaarsete suvehooajale keskmistatud ääritingimuste korral.

4 TULEMUSTE HINDAMINE

Käesolevas töös läbiviidud katse ning koostatud arvutusmodelite võrdluse abil uuritud tulemuste võrdlusest selgus, et algniiskuse ümber jagunemine kivivillas võtab kaua aega ega jagune 10 päeva jooksul 1,2 m kõrguses alas ümber. Siiski õnnestus ebaühtlaselt ümber jaotunud niiskusega seina suhteliselt hästi arvutusmodelis jäljendada ning kuivamise kogukestus oli ligikaudu sama. Seina läbiva õhuvoolu korral oli erakordselt soojal suveperioodil konvektiivselt kuivatatava seina kuivamise kestus ilma pausideta 2 nädalat, seina algniiskus oli $2,28 \text{ l/m}^3$ ning seina läbiv õhuvool keskmiselt $23 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$. Sellisel viisil kuivatades saavutati peale kahte nädalat õhuvoolu lõpuks niiskuspotentsiaal 0 üle seina pikkuse. Difusiooni teel kuivatatav katsekeha kuivas pidevalt ilma pausideta, kokku 3 nädalat. Ka 3 nädalase kuivamisperioodi jooksul ei saavutatud nulli lähedast kuivamispotentsiaali. Paneeli avatud otste poolsete osade kuivamispotentsiaal langes mõnel määral, paneeli keskel asuva osa kuivamispotentsiaal oli katse lõpus suurem kui katse alguses, põhjustatuna tõusnud välistemperatuurist ja langenud suhtelisest niiskusest väljas.

Katsekehade õhutiheduse saavutamine oli suur väljakutse. Isegi vineeri ja bituumen-alumiinium teibiga kaetud paneeli ala- ja ülaosa vahel lekkis alarõhu olukorras õhku sisse. Õhuleket aitas olulisel määral vähendada bituumen-alumiinium teibi servade silikoonimine. Õhulekke elimineerimata jätmine võib kaasa tuua kompensatsiooniõhu võtmise alarõhu tekitamiskoha lähedalt ja seega jäävad sellest kaugemal asuvad seina osad kuivamata.

Arvutusmodeli kohased tulemused näitavad, et kuivatamine talveperioodil ilma õhuvoolu soojendamata ei oma positiivset mõju. Ka õhuvoolu soojendades on tarvilik kõrge õhuvooluhulk, et kütta üles kogu õhuvoolu teekonnal asuv ala. Ka kõrge õhuvoolu ja õhu pealevoolu temperatuuri korral jääb välispinna lähedale külm ja kõrge suhtelise niiskusega ala. Selle vastu võib aidata soojendamisperioodil seina välispinna ajutine soojustamine. Lisaks on rahakulu õhu soojendamisele talvel kümnetesse tuhandetesse ulatuv (olenevalt kuivatatava seina geomeetriast). Suveperioodil kuivatades jääb seina kõrge suvine veeauru sisaldus, mis temperatuuride langedes koguneb külma pinna lähedale. Õhu veeauru sisaldust langetades on võimalik tagada lõppniiskuse tase, mis ka talvel välistab kõrge suhtelise niiskuse tekke külma pinna lähedal.

5 JÄRELDUSED

Kivivillaga täidetud sändvitšpaneelidest seinu kuivatamise osas võib välja tuua järgmised järeldused:

- Püsiva temperatuurikeskkonna katsest ilmnes, et niiskusmassi vähenemine konvektiivselt kuivatades võib ületada kümnetes kordades massi vähenemist difusiooni teel kuivades.
- Ka väga väikesed lekkekohad võivad põhjustada kontrollimatut õhuvoolu ja seega kompensatsiooniõhu võtmist mujalt, mistõttu jäävad rõhulangust kaugemal asuvad osad kuivamata .
- Kahemõõtmelise soojus- ja niiskuslevi ning ühemõõtlemissõhuvoolu korral on kuivamine modelleritav juhul, kui ei esine märkimisväärseid õhulekkeid.
- Talvise kuivatuse korral on oluline õhku enne paneeli tõmbamist kütta. Seejuures on oluline õhuvoolu kiirus, et õhk ei jahtuks liialt enne seinu läbimist. Sellest sõltub olulisel määral kuivatamise kiirus ja lõppniiskus.
- Arvutusmudeli kohane talvise kuivatusmeetodi õhuvooluhulk paneeli ruumala kohta, mille suurendamine enam märkimisväärset kuivamise kiirust ei suurenda on 3650 (l/min*m³). 6 meetri pikkuse, 8 meetri kõrguse ja 0,23 m paksuse seinu korral ning seinu voolava õhu pealevoolu temperatuuri 40 °C korral annab see kuivamise kiiruseks 21 päeva.
- Seinu niiskustaseme parima tulemuse saavutamiseks on soovitatav vähendada õhu veeauru sisaldust, mida saab teha, kui seinu sisse tõmmatav õhk töödelda läbi kompressori.
- Arvutusmudeli kohane suvise kuivatusmeetodi õhuvooluhulk paneeli ruumala kohta, mille suurendamine enam märkimisväärset kuivamise kiirust ei suurenda on 27 (l/min*m³). 6 meetri pikkuse, 8 meetri kõrguse ja 0,23 m paksuse seinu korral annab see kuivamise kiiruseks 9 päeva.
- Suvise kuivatusmeetodi puhul on vaja välja töötada seadeldis kompressori ja seinu vahele, mis käitub justkui õhu jaoks mõeldud hüdrofor ning säilitab rõhku ja seinu sisse voolavat kuiva õhuvoolu.

6 KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö raames on uuritud teraslehtedega kaetud kivivillast sändviitšpaneelide kuivatamist konvektsiooni teel ja võrreldud seda difusiooni teel kuivamisega. Püsiva temperatuurikeskkonna katsest selgus, et võrreldes kuivamisega difusiooni teel aitab konvektiivne kuivatamine niiskusmassi vähendada kümnetes kordades enam. Püsiva temperatuurikeskkonna katse läbiviimiseks püstitati Taltechi testhoonesse katsesein, millest üks osa kuivab konvektsiooni teel, teine osa difusiooni teel. Testsein muudeti võimalikult õhutihedaks bituumen-alumiinium teibi ja sanitaarsilikooniga, kruviaugud kaotati, et vältida õhuleket. Testseina paigaldati temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurid ning testperioodi vältel mõõdeti ka õhuvoolu läbi seina. Peale testseina monteerimist ja õhutihedaks tegemist süstiti seina välispinda vesi, mis jagunes ümber 10 päeva vältel. Katse kestis koos vee ühtlustumisega 32 päeva. Katse tulemustest selgus, et konvektsiooni teel kuivatatavas katsekehas saavutati 32. päeva lõpuks kuivamispotentsiaal 0 terve seina ulatuses. Difusiooni teel kuivava katsekeha kuivamispotentsiaal seina keskel oli 32. päeval suurem kui katse alguses, tulenevalt tõusnud välis temperatuurist ja langenud välisest suhtelisest niiskusest. Mõõdetud ääretingimuste abil koostati arvutusmudel tarkvaras Delphin 5.9 ning simuleeriti katsetatud olukorda. Mudel arvestab niiskuse ja soojuse liikumist kahes suunas ning õhuvoolu liikumist ühes suunas. Oluline on ka algniiskuse mudeldamine. Mõõte ja arvutustulemused ühtisid hästi kuid süstlapunktide sammu oleks võinud tihendada, et saada veel paremini klappivaid mõõte- ja arvutustulemusi. Teine variant oleks olnud kasutada arvutustarkvara, mis võimaldab mudeldada algniiskuse jaotust kolmes suunas ning arvutada õhuvoolu kahes suunas või siis varuda rohkem aega niiskuse ümberjagunemiseks. Mõõtetulemuste põhjal valideeritud mudeli alusel koostati arvutusmudel reaalseste mõõtmega seina jaoks ning leiti strateegia konvektiivseks kuivatamiseks suve- ja talveperioodil. Ilmneb, et talvine kuivatamine on oluliselt energia- ja rahakulukam ning nõuab palju energiat õhu kütmisele ning suure õhuvoolu tagamisele. Õhuvool, mille suurendamine enam oluliselt kuivamise kiirust ei suurenda on talvelperioodil 3600 (l/min*m³). Seejuures on oluline ka sisse tõmmatava õhu temperatuur, ainult ühe õhuvoolu tõstmisest ei piisa. Suvise kuivatuse miinuseks on kõrgem veeauru sisaldus õhus. Seda on võimalik vähendada õhu töötlemisega läbi kompressori. Seeläbi on võimalik saavutada niiskuslikult parem lõpptulemus väiksema energiakuluga kui talvise kuivatuse meetodit kasutades. Õhuvool, mille suurendamine enam oluliselt kuivamise kiirust ei mõjuta on suveperioodil 30 (l/min*m³).

SUMMARY

This master 's thesis studies drying steel coated sandwich panels by forced convection and compares it to diffusive drying. The test was conducted in Taltech test building by building a testwall and mounting it between indoor and outdoor climate. One part of the testwall dries by convection while the other part dries by diffusion. The wall was made airtight on its perimeter with bitumen-aluminium tape and the edges of the tape were sealed with silicone to minimize air leakages. The screws which normally fix the sandwich panels to columns were removed and screw holes were sealed the same way as the perimeter of wall. Temperature and relative humidity sensors were installed to the wall to measure inside conditions of the wall. Airflow through the wall was also measured during the test period. Water was injected to the wall after mounting and sealing it and then it redistributed over the volume of wall during 10 days. The whole test period lasted for 32 days, including the redistribution of water. Measured boundary conditions of wall were used to create a calculation model in the software Delphin 5.9 to simulate the measured drying period. The model computes heat/moisture movement in 2 directions and airflow through the material in 1 direction. Initial humidity modeling is also important to get the closest results to measured situation. Measured and calculated results were quite compatible but would have been even more compatible if there were more water injection points. Using a software which allows to distribute initial moisture in 3 directions and airflow through the material in 2 directions would have been a way to get the calculation match better with measurements. Water injection point step reduction or longer redistribution time would have been a way to get the measurements match better with the calculation.

Based on a model validated with the measurement results, a calculation model was created for a wall with commonly used dimensions to work out a strategy for drying a wall by forced convection on summer and winter season. It appears that drying on winter season consumes a lot of energy to heat the air and to ensure high air flow rate to heat the wall itself. The disadvantage of drying on summer season is high density of water vapour in the air. However, this can be reduced by processing the air through air compressor. Thereby it is possible to achieve better hygrothermal performance with lower energy consumption than using the winter season method.

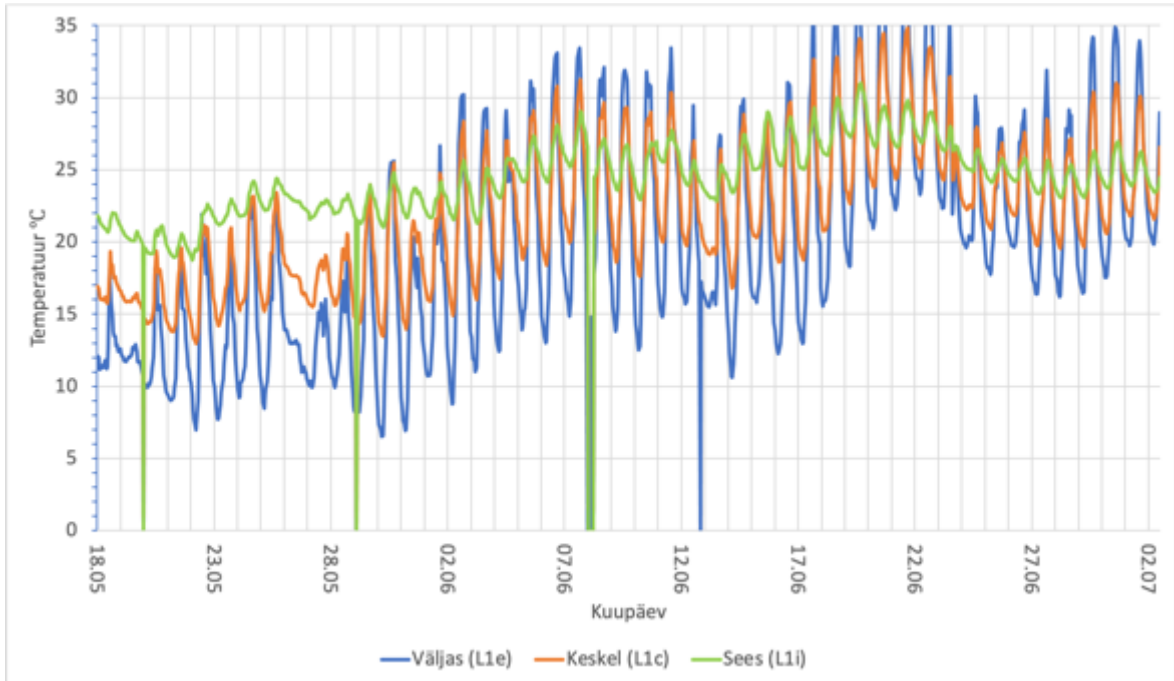
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Ruukki Oy. (2017). Assembly instructions for sandwich panels SPA.
- [2] Hubert Piikov. (2020). Hygrothermal performance of lightweight sandwich panels with stone wool insulation
- [3] Lars Pfeiffer. (2005). Durability Assessment of Sandwich Panel Construction
- [4] J.M Davies (2008). Lightweight Sandwich Construction
- [5] Targo Kalamees, Juha Vinha. (2004). Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations. *Journal of Building Physics*, 27(3), 199–220.
- [6] Uus Riin. (2020). Analysis of Tallinn precipitation intensity according to AS Tallinna Vesi monitoring data in 2013-2019.
- [7] Andreas Nicolai, John Grunewald, Jianshun Jensen Zhang. (2015). Delphin 5 User manual and program reference. Technische Universität Dresden.
- [8] <https://conservationphysics.org/atmcalc/atmoclc1.html>
- [9] Kristo Kalbe, Hubert Piikov, Targo Kalamees. (2020). Moisture dry-out from steel faced insulated sandwich panels.
- [10] Andreas Nicolai, John Grunewald. (2016). CHAMPS-BES Program for Coupled Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulation in Building Envelope Systems . Technische Universität Dresden.
- [11] Lewis Greenspan. (1976). Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions
- [12] Martin Victor Johansson, Fabrice Testa, Imen Zaier, Pierre Perrier, Jean Philippe Bonnet, Philippe Moulin, Irina Graur. (2018). Mass flow rate and permeability measurements in microporous media
- [13] Piotr Kosiński, Brzyski, Przemysław, Suchorab, Zbigniew, Łagód, Grzegorz. (2020). Comparison of air permeability and thermal properties of loose mineral wool and hemp fibers

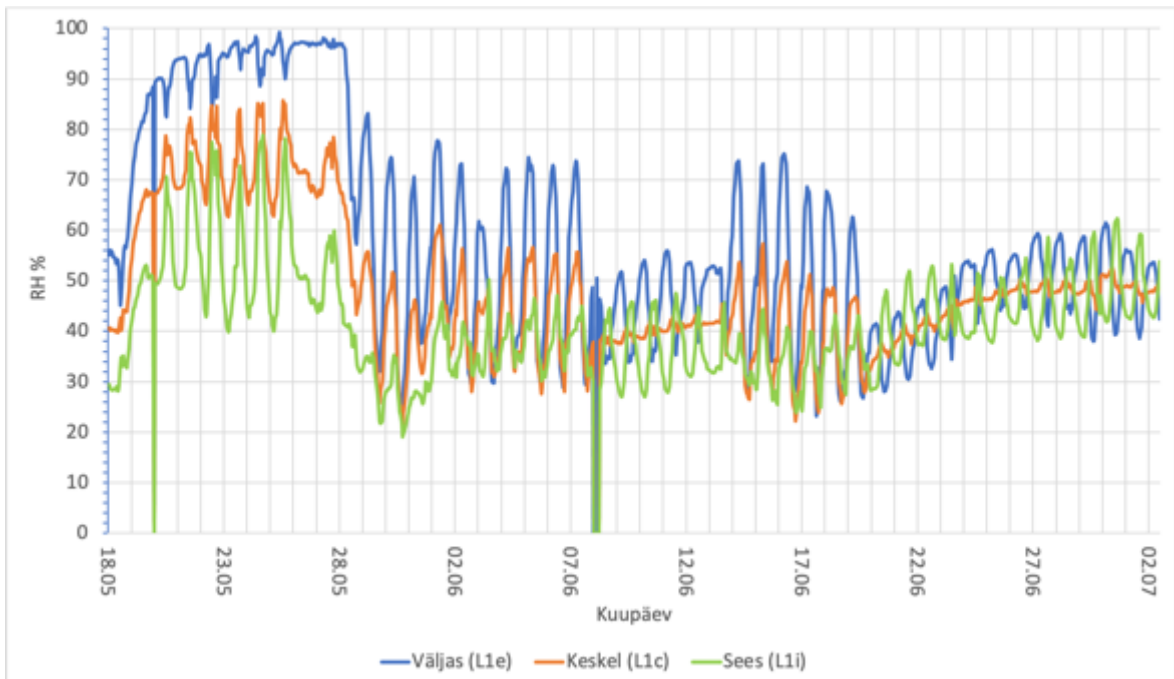
LISAD

LISA 1 MÕÕTETULEMUSED

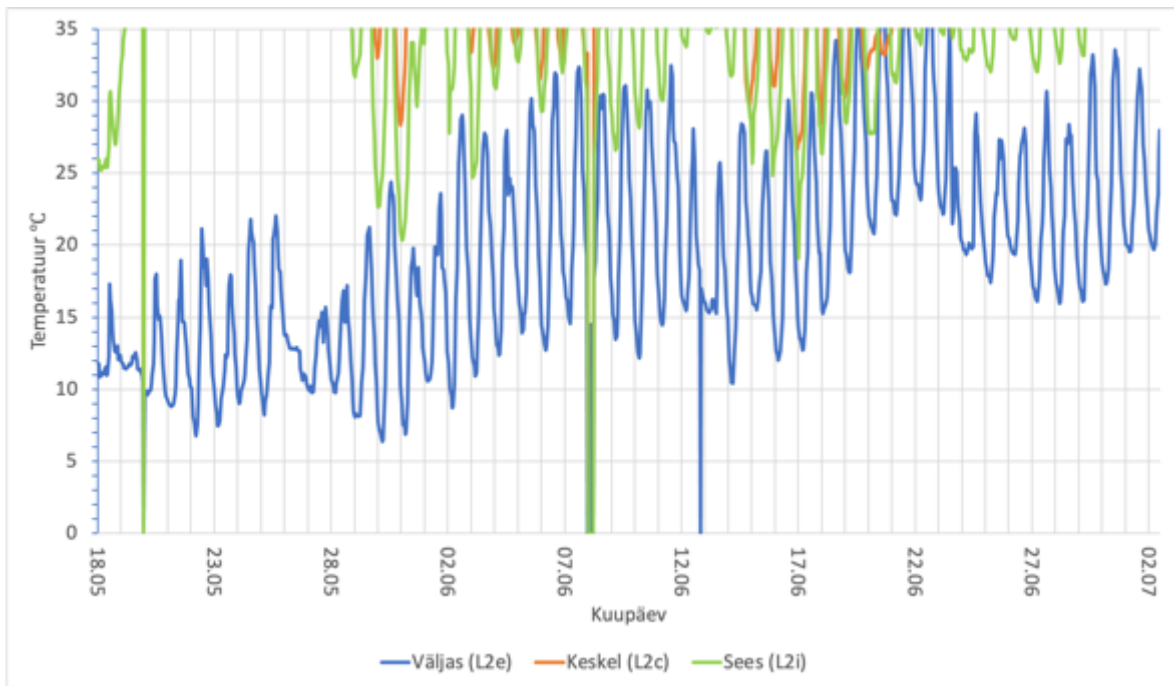
Järgnevalt on toodud testseina mõõtepunktide temperatuurid ja suhtelised niiskused. Graafikutel kehtib põhimõte- Sinine joon tähistab välispinna lähedal paiknevat sensorit, oranž joon sise- ja välispinna keskel asuvat sensorit ning roheline joon tähistab sisepinna lähedal asetsevat sensorit.



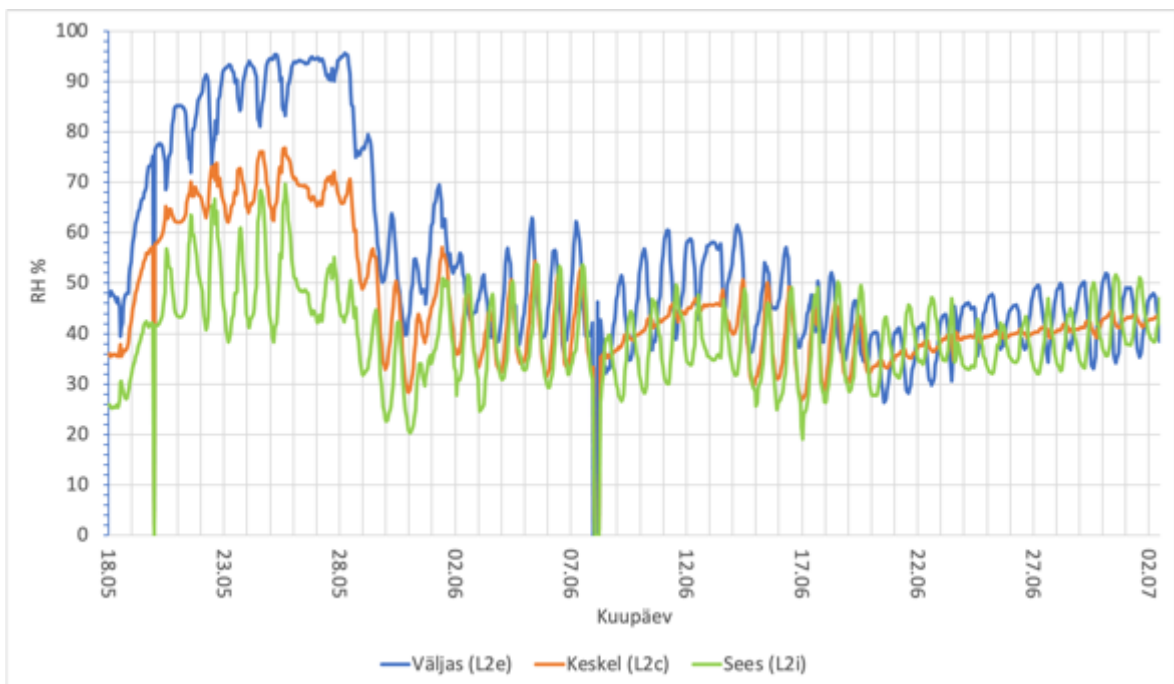
Joonis L1.1 temperatuur punktides (L1i, L1c, L1e)



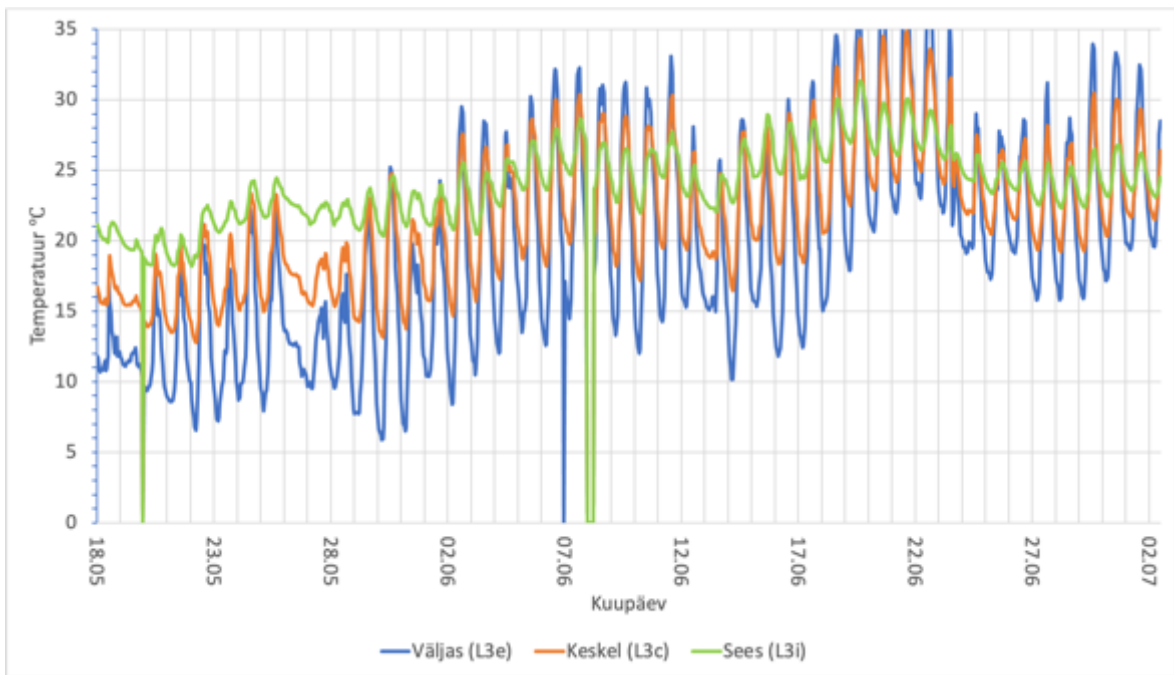
Joonis L1.2 suhteline niiskus punktides (L1i, L1c, L1e)



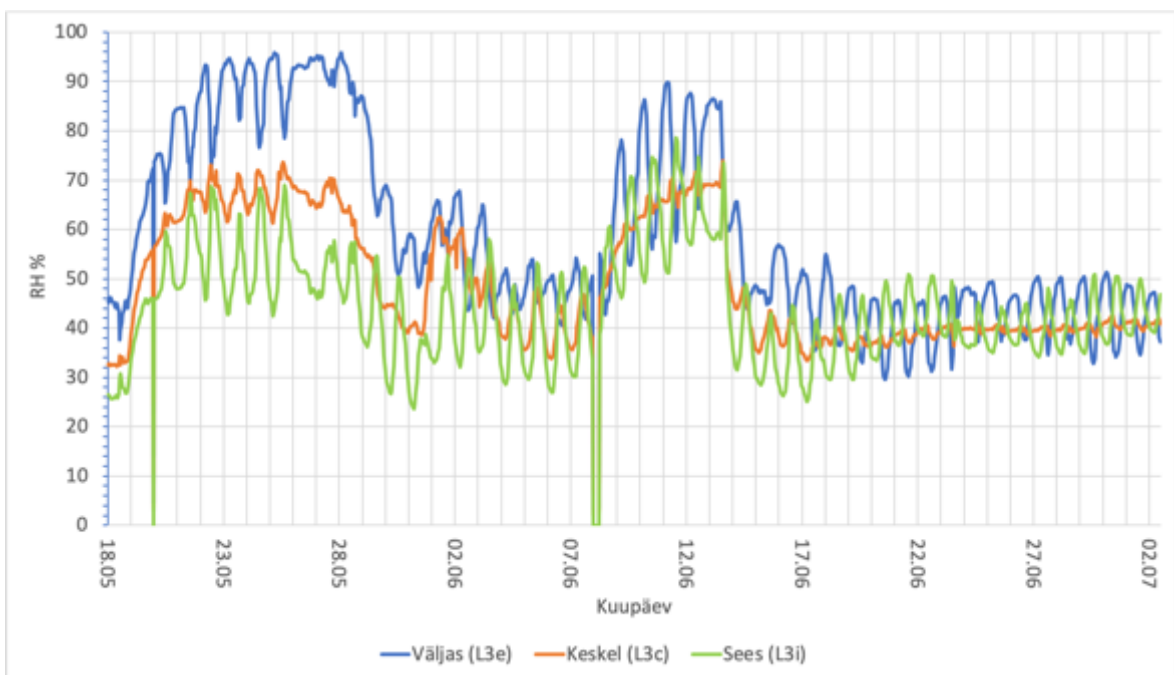
Joonis L1.3 temperatuur punktides (L2i, L2c, L2e)



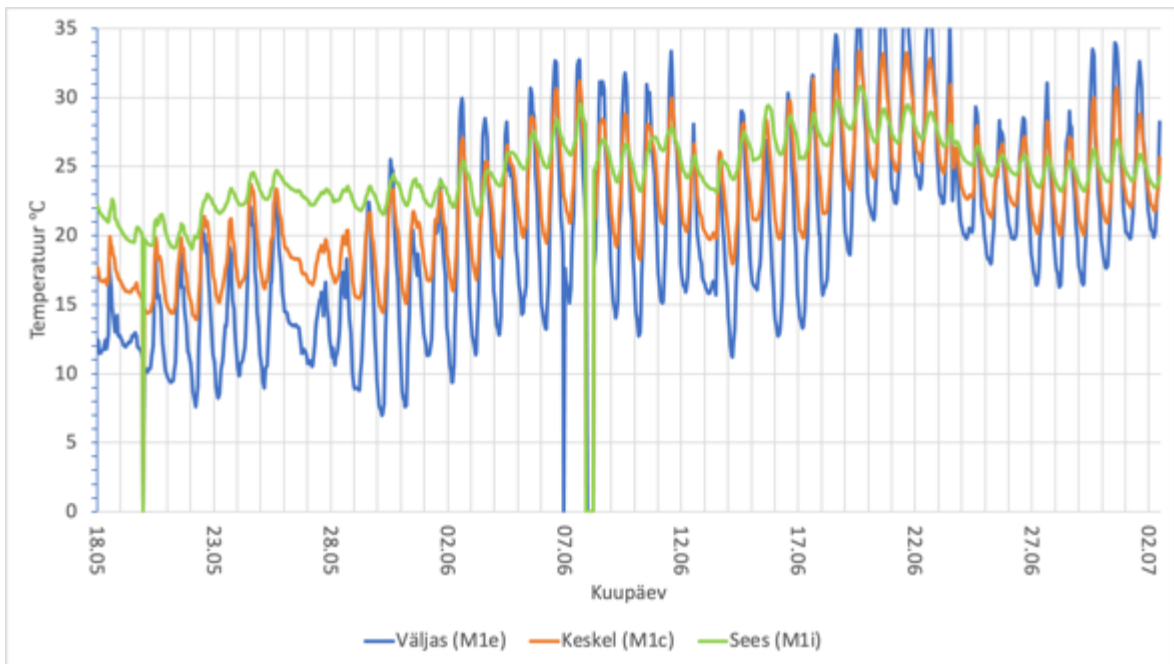
Joonis L1.4 suhteline niiskus punktides (L2i, L2c, L2e)



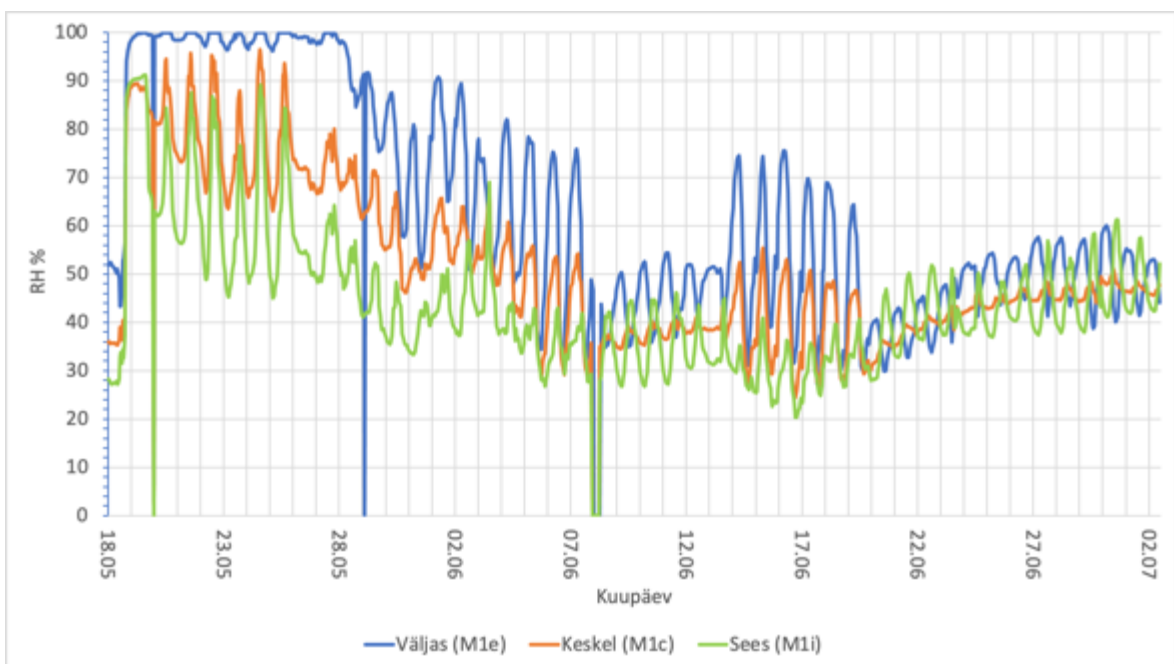
Joonis L1.5 temperatuur punktides (L3i, L3c, L3e)



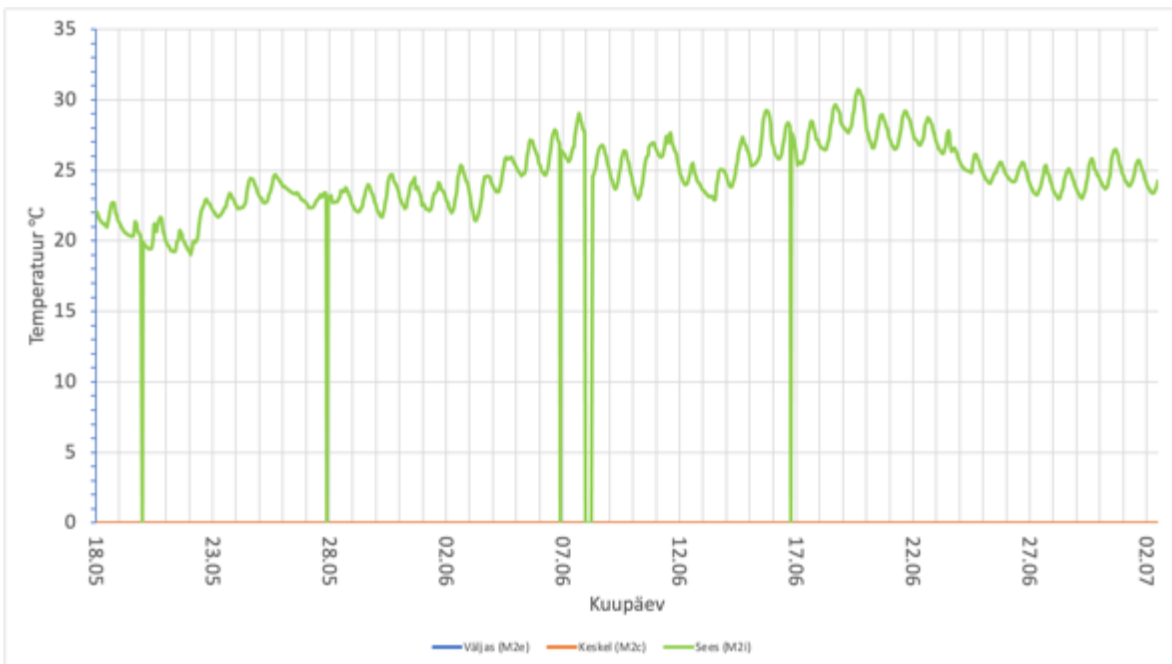
Joonis L1.6 suhteline niiskus punktides (L3i, L3c, L3e)



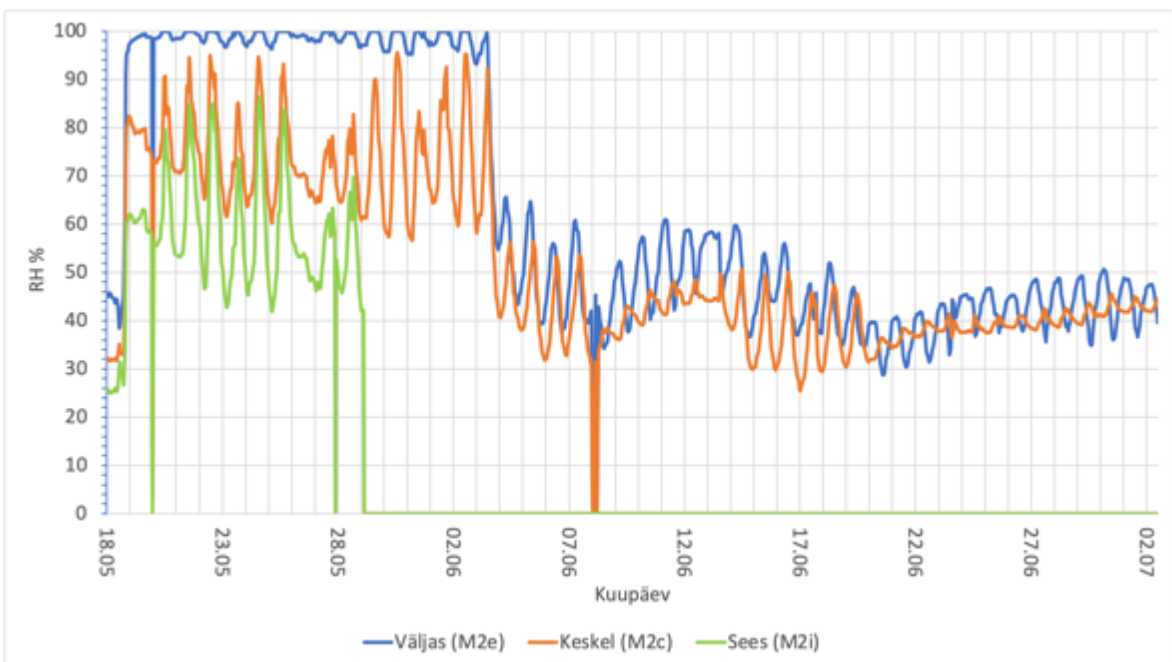
Joonis L1.7 temperatuur punktides (M1i, M1c, M1e)



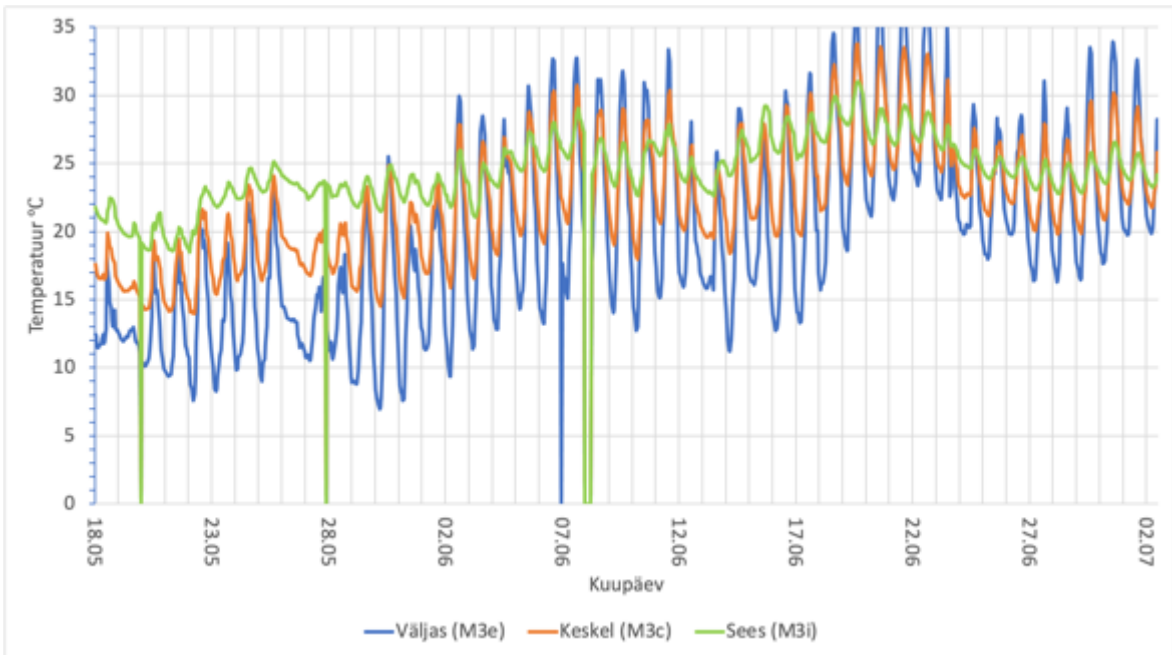
Joonis L1.8 suhteline niiskus punktides (M1i, M1c, M1e)



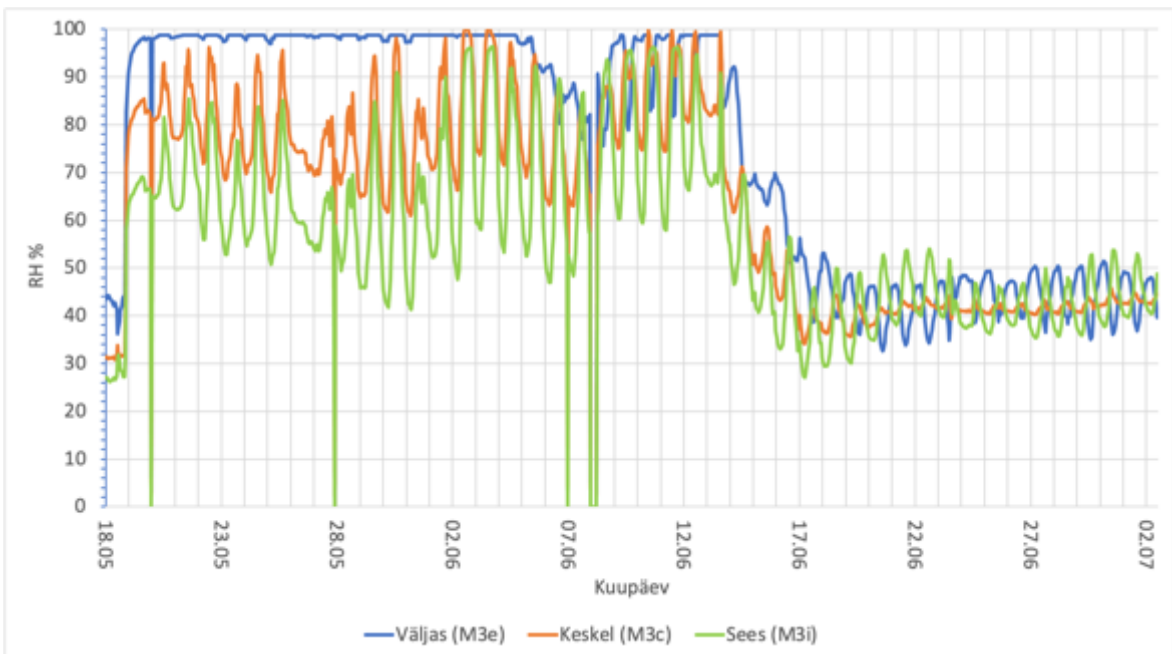
Joonis L1.9 temperatuur punktides (M2i)



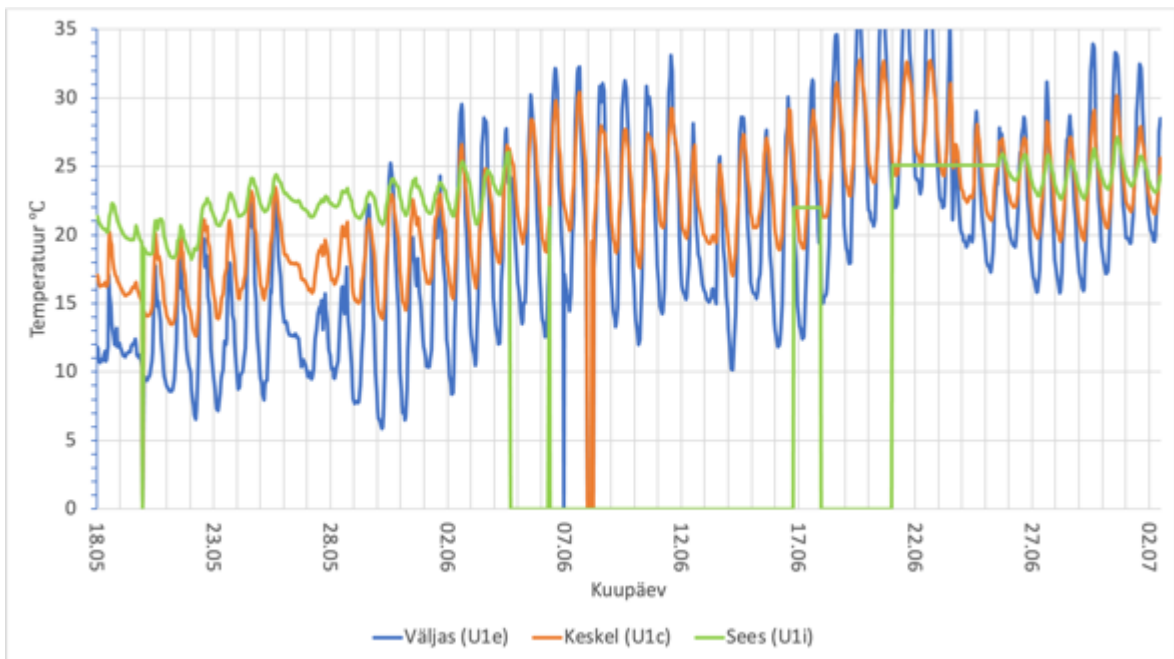
Joonis L1.10 suhteline niiskus punktides (M2i, M2c, M2e)



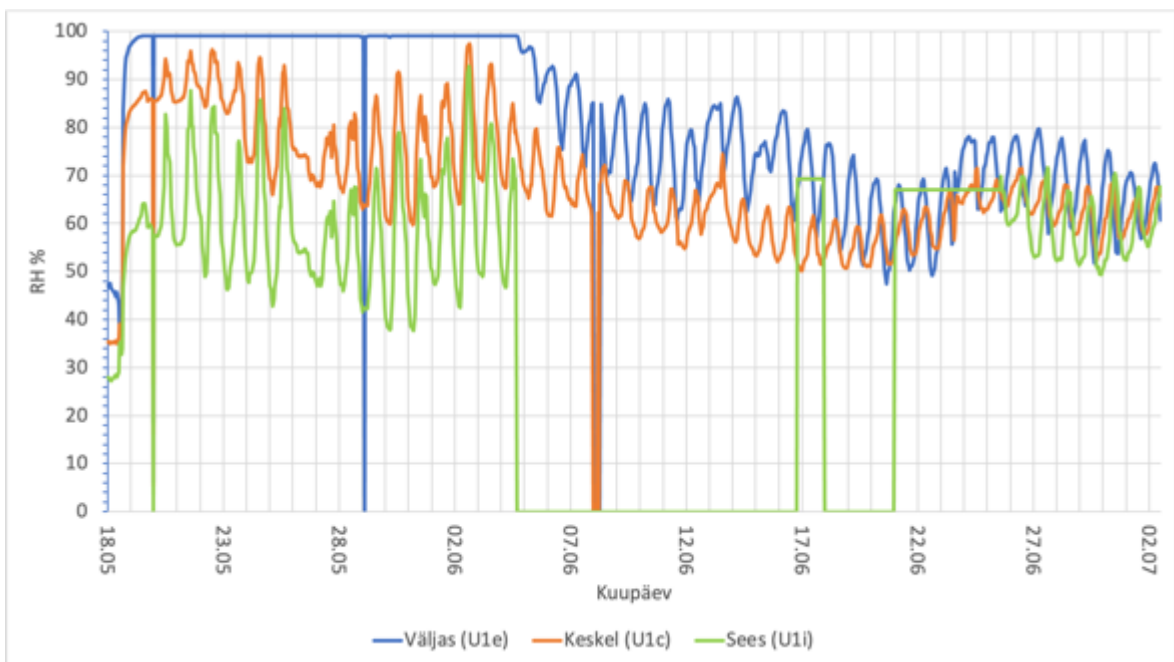
Joonis L1.11 temperatuur punktides (M3i, M3c, M3e)



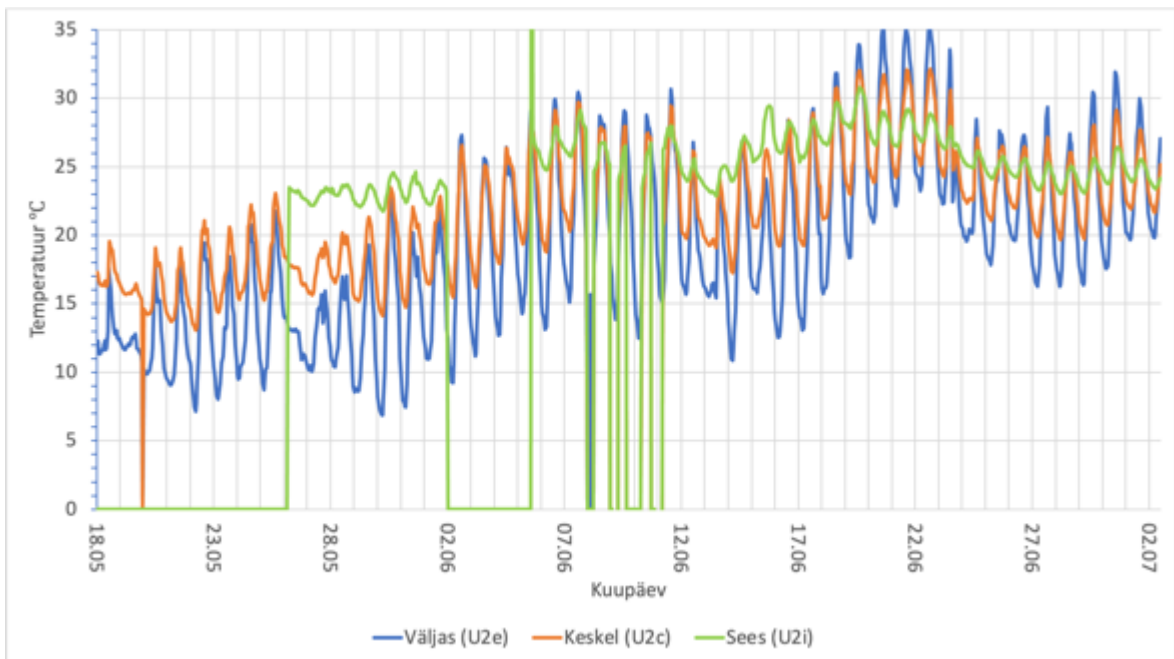
Joonis L1.12 suhteline niiskus punktides (M3i, M3c, M3e)



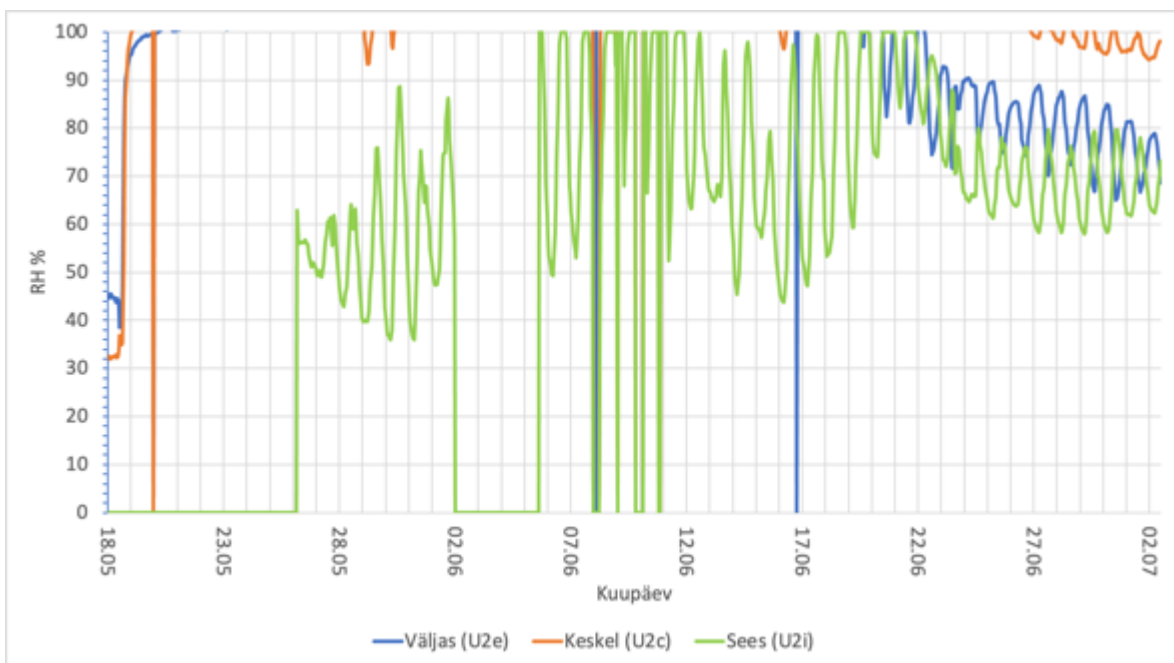
Joonis L1.13 temperatuur punktides (U1i, U1c, U1e)



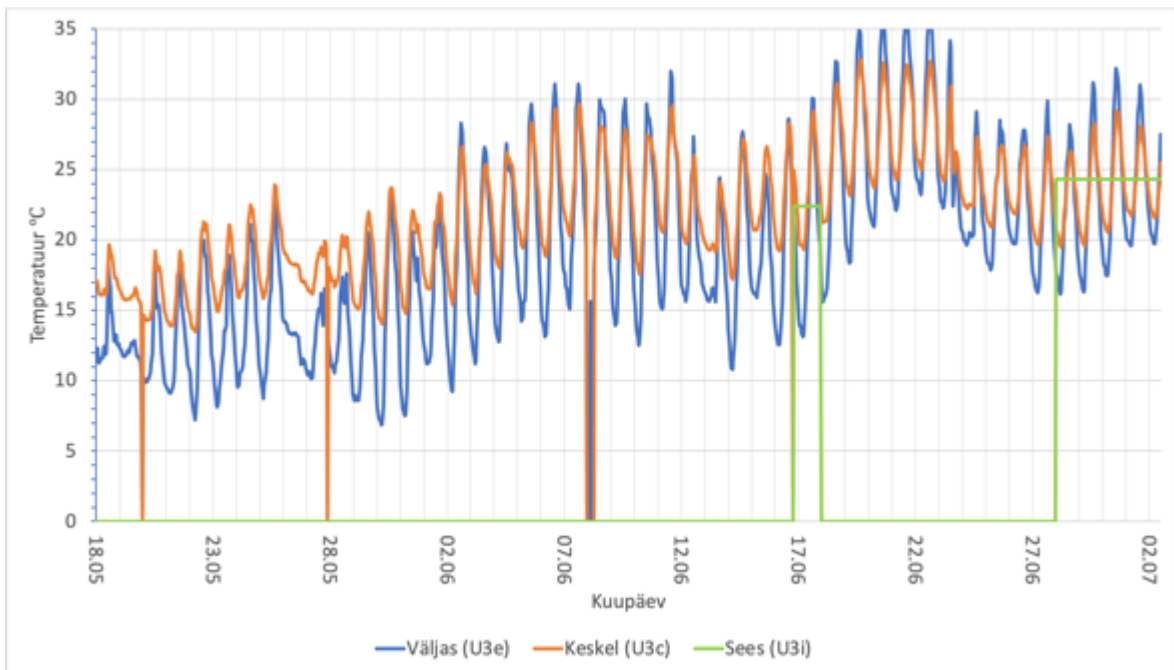
Joonis L1.14 suhteline niiskus punktides (U1i, U1c, U1e)



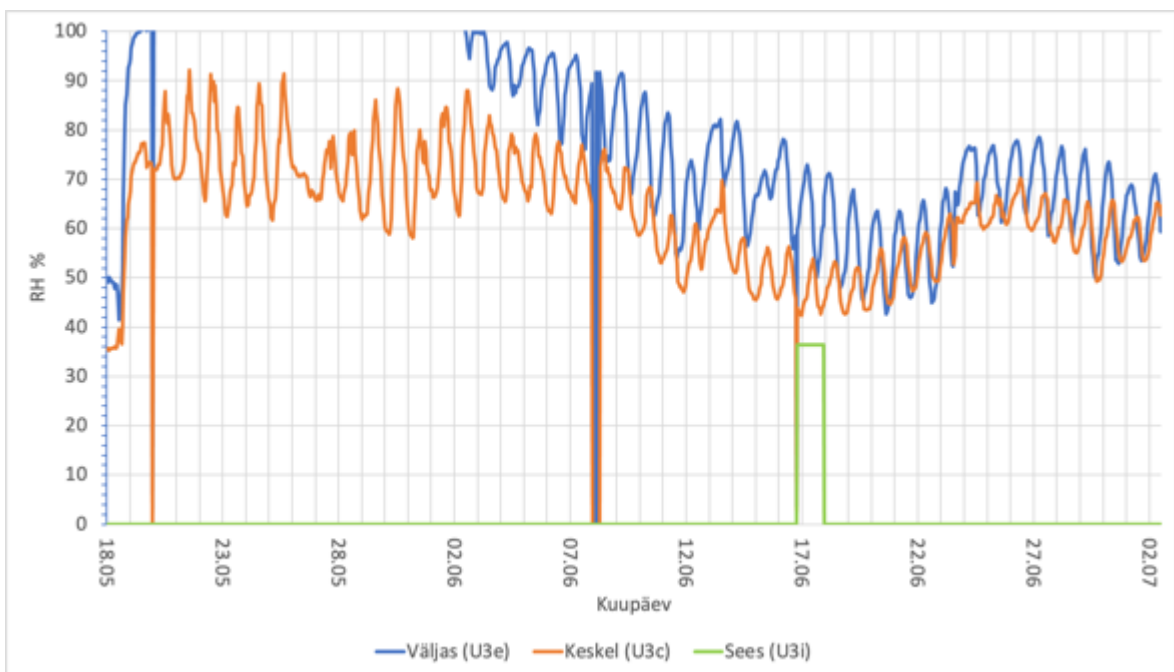
Joonis L1.15 temperatuur punktides (U2i, U2c, U2e)



Joonis L1.16 suhteline niiskus punktides (U2i, U2c, U2e)



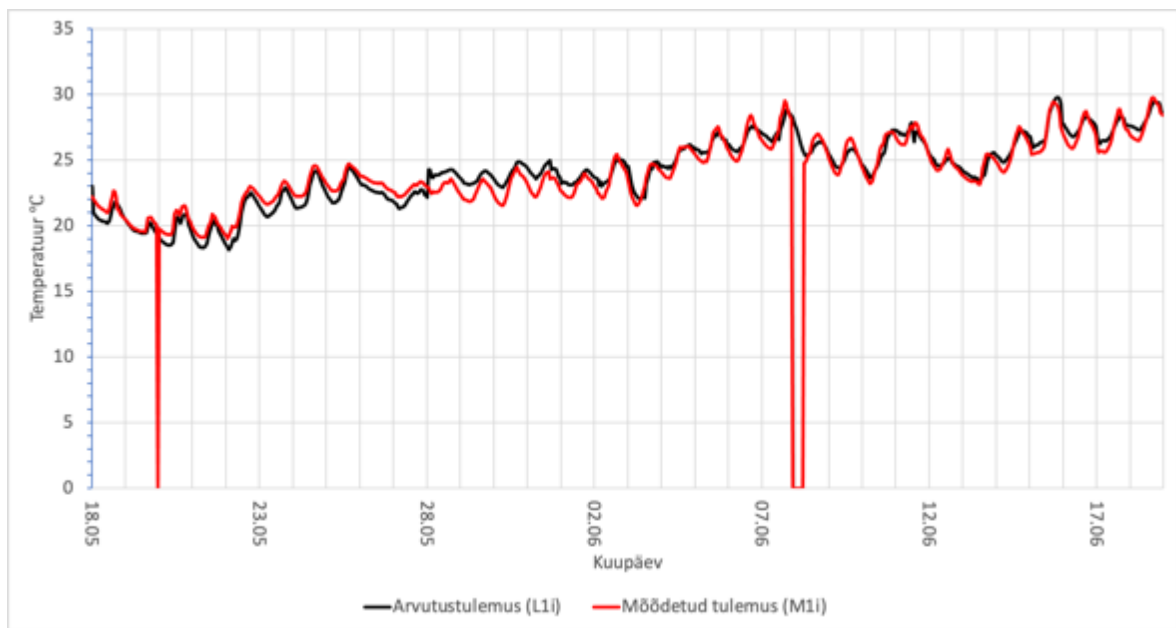
Joonis L1.17 temperatuur punktides (U3i, U3c, U3e)



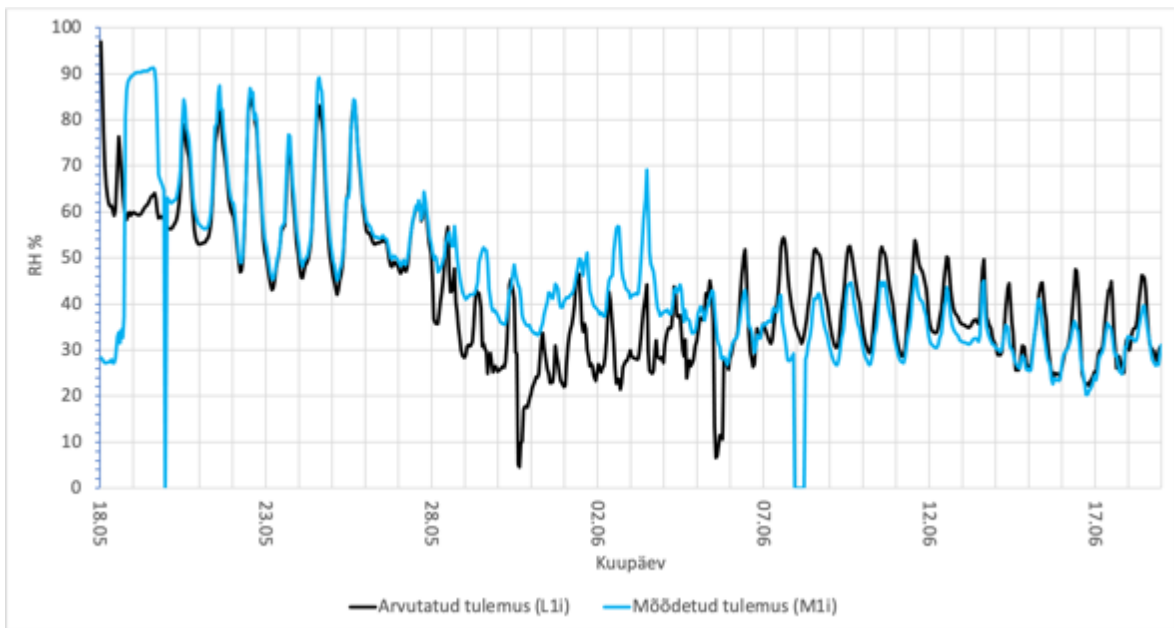
Joonis L1.18 suhteline niiskus punktides (U3i, U3c, U3e)

LISA 2 MÕÕTE- JA ARVUTUSTULEMUSTE VÕRDLU

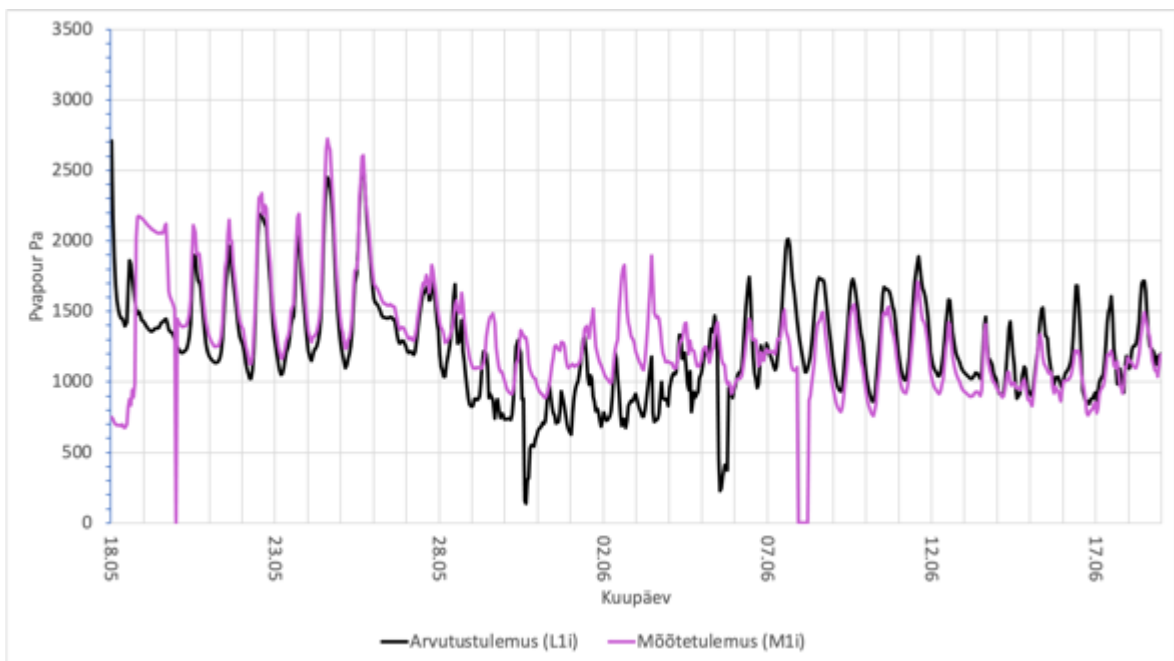
Järgnevalt on esitatud arvutus- ja mõõtetulemused mõõtepunktide kaupa. Kehtib põhimõte- must joon tähistab arvutustulemust, punane joon mõõdetud temperatuuri, sinine joon mõõdetud suhtelist niiskust ja lilla joon mõõdetud temperatuuri ja suhtelise niiskuse põhjal arvutatud veeauruosarõhku. Konvektsiooni teel kuivava katsekeha mõõtetulemused võeti valdavalt tähisega "M" algavatest mõõtepunktidest kuna need asusid süstlapunktidele lähemal ja klappisid paremini arvutustulemustega. Arvutustulemuste tähistusel on kasutatud põhimõtet- tähisega "L" algavad tulemused kirjeldavad konvektsiooni teel kuivava arvutusmudeli mõõtepunkte ja tähisega "U" algavad tulemused kirjeldavad difusiooni teel kuivava katsekeha arvutustulemusi mõõtepunktides. Difusiooni teel kuivavas katsekehas ei funktsioneerinud andur U3i kogu katseperioodi vältel. Seetõttu ei ole seda punkti ka siin kajastatud.



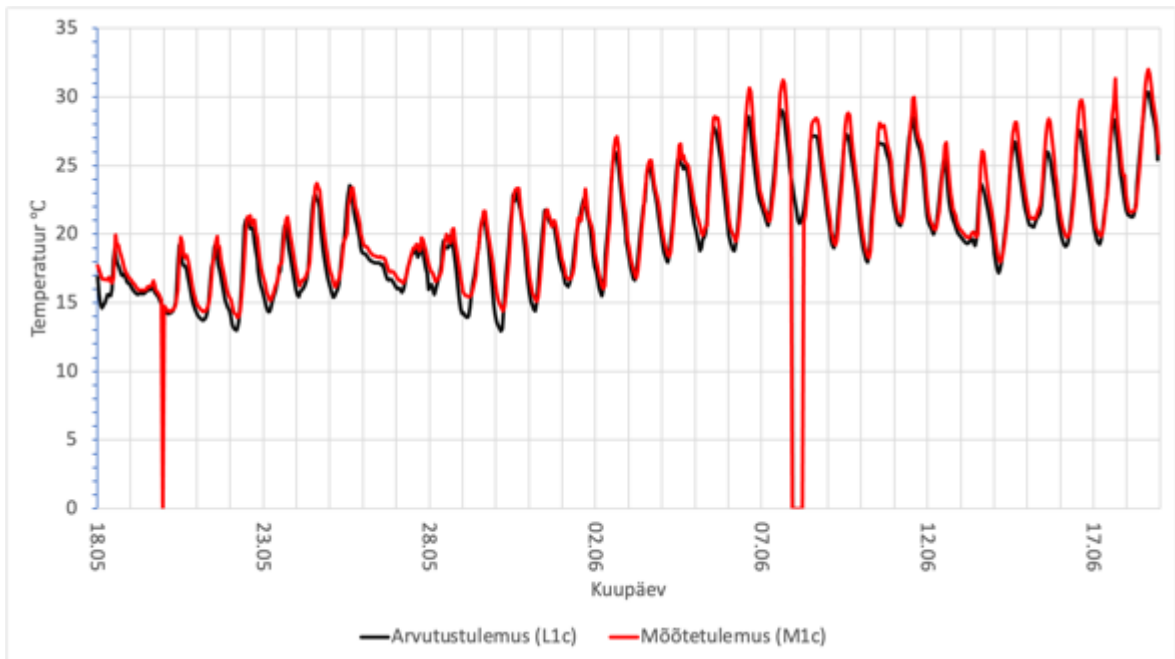
Joonis L2.1 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M1i (arvutusmudelis L1i)



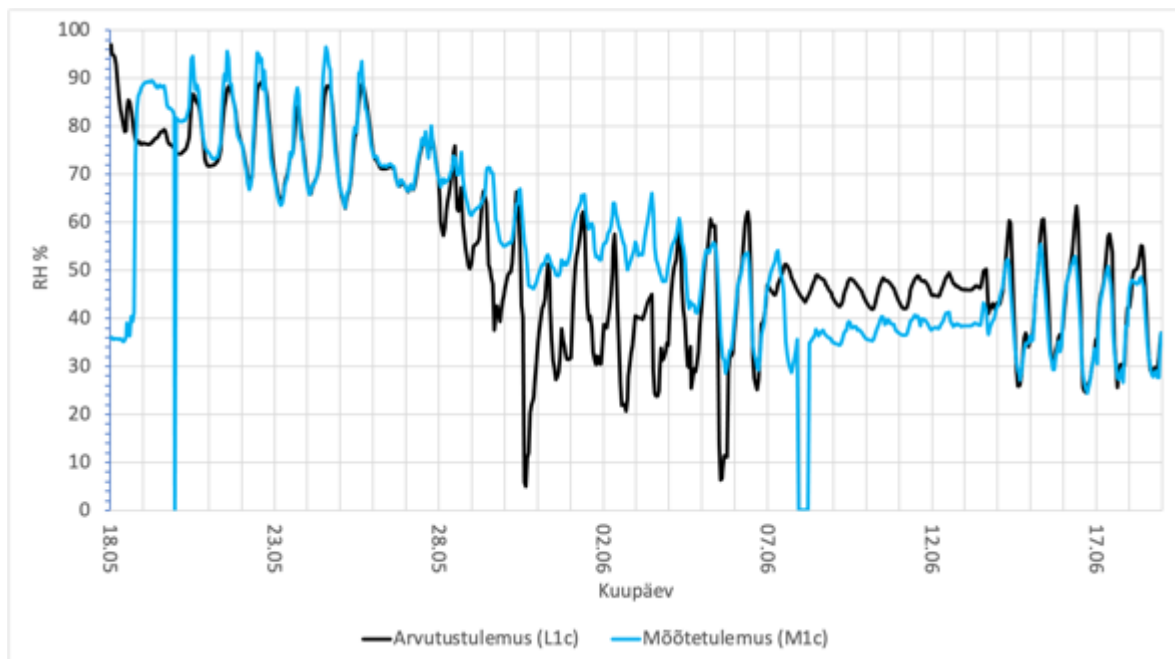
Joonis L2.2 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M1i (arvutusmudelil L1i)



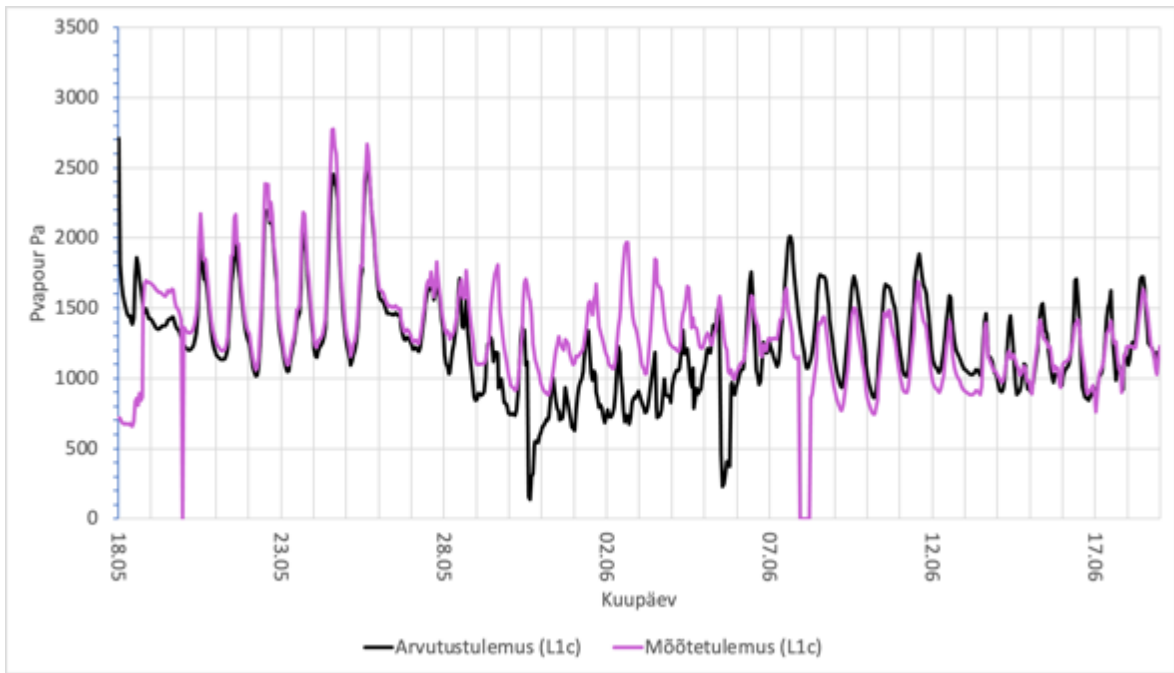
Joonis L2.3 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis M1i (arvutusmudelil L1i)



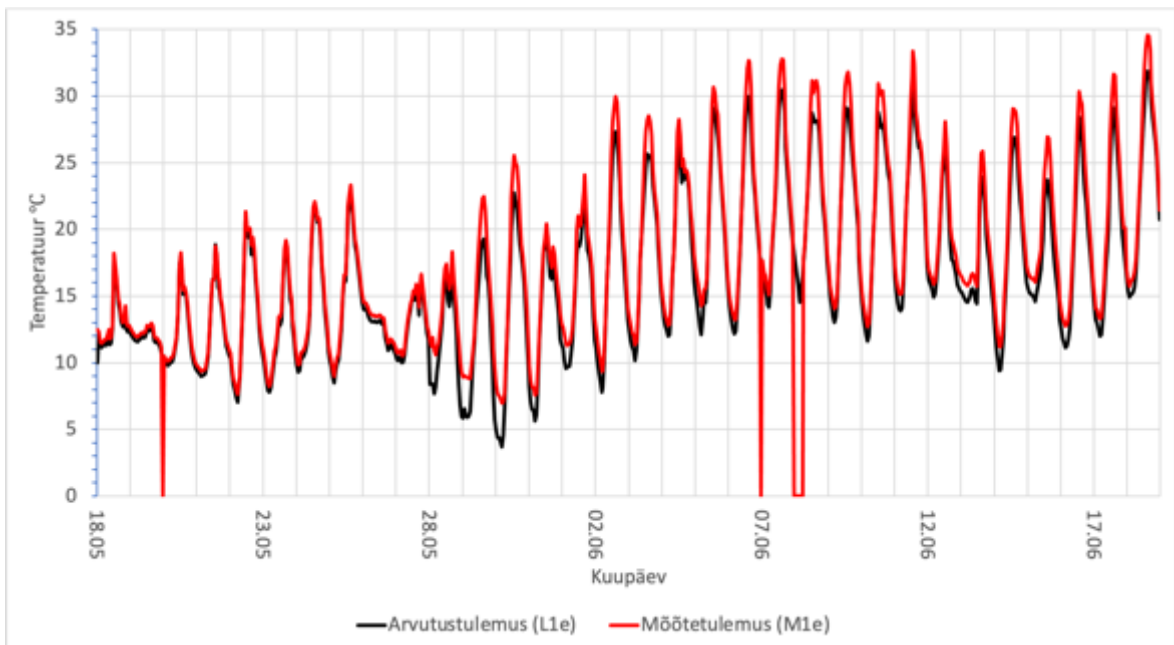
Joonis L2.4 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M1c (arvutusmudelil L1c)



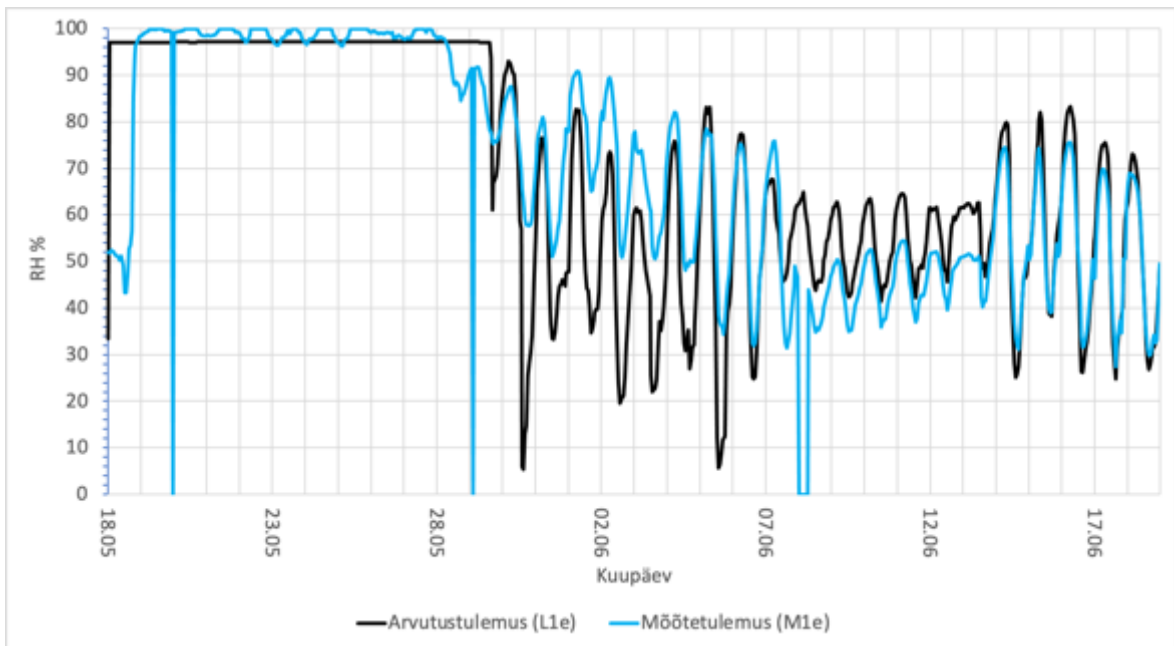
Joonis L2.5 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M1c (arvutusmudelil L1c)



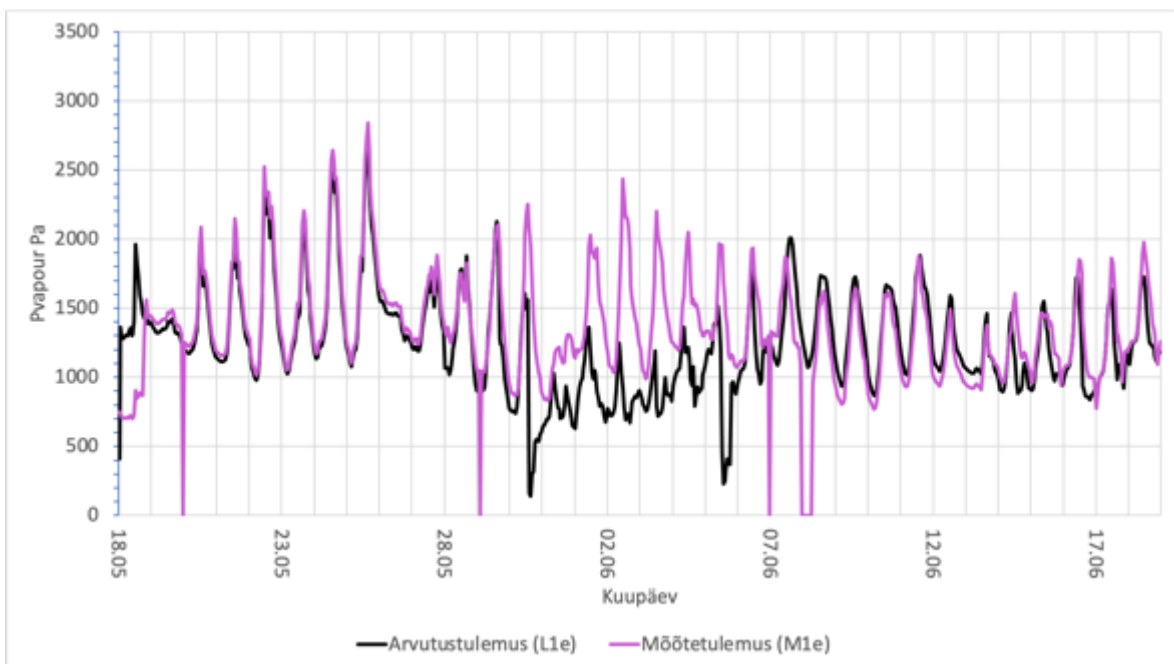
Joonis L2.6 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis M1c (arvutusmudelil L1c)



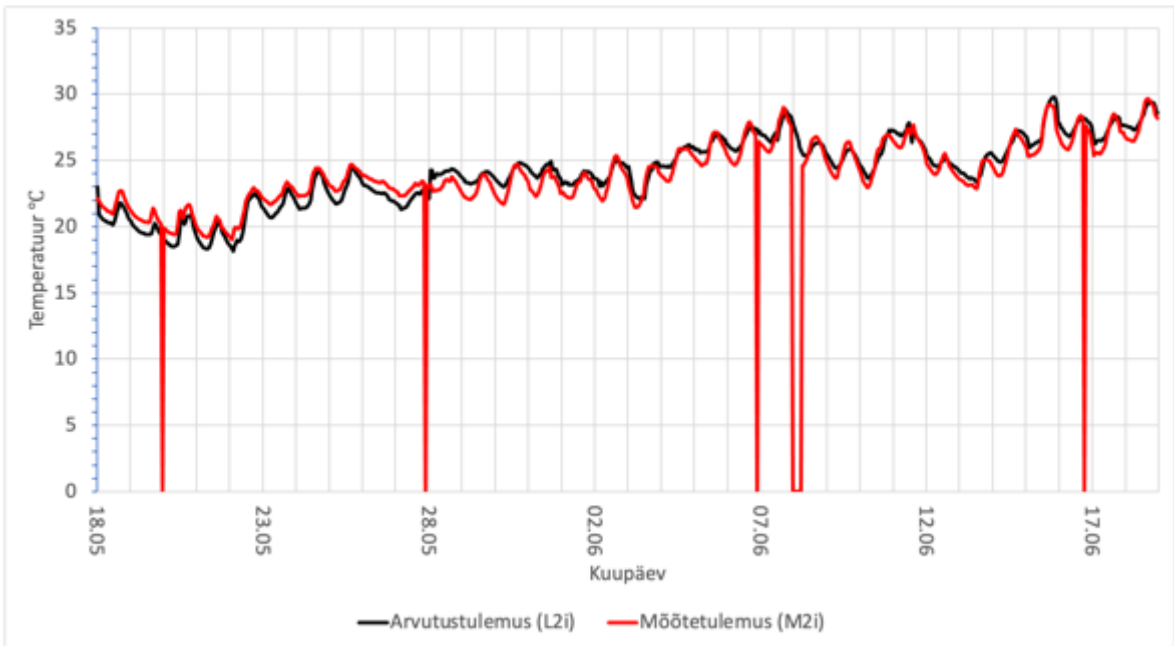
Joonis L2.7 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M1e (arvutusmudelil L1e)



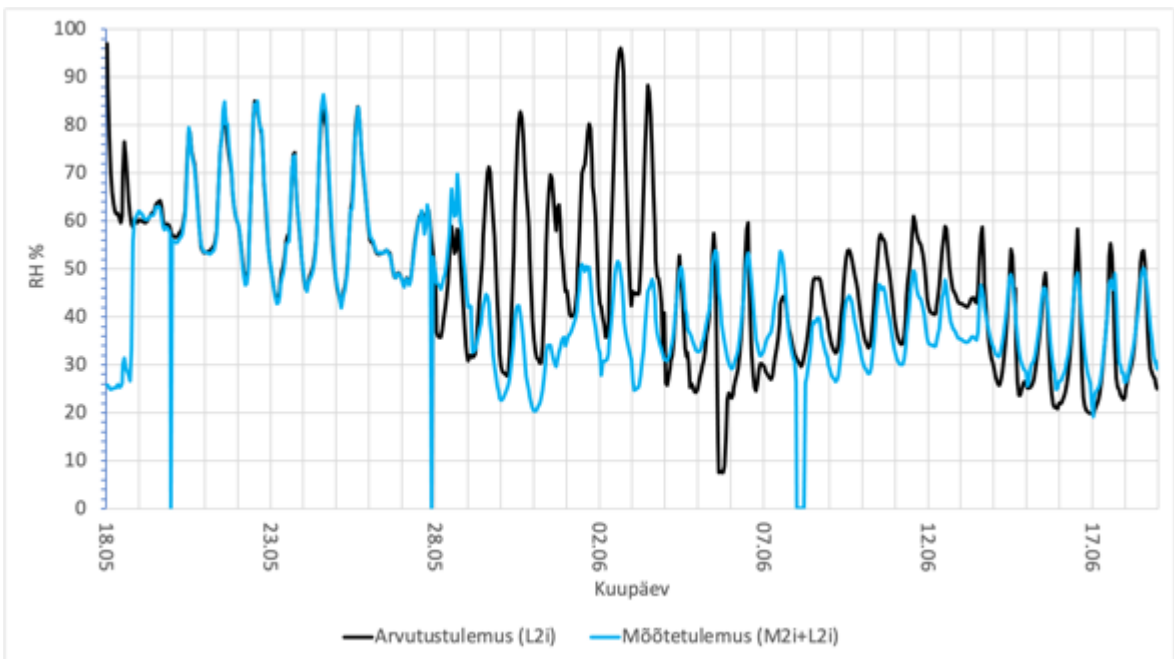
Joonis L2.8 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M1e (arvutusmudelil L1e)



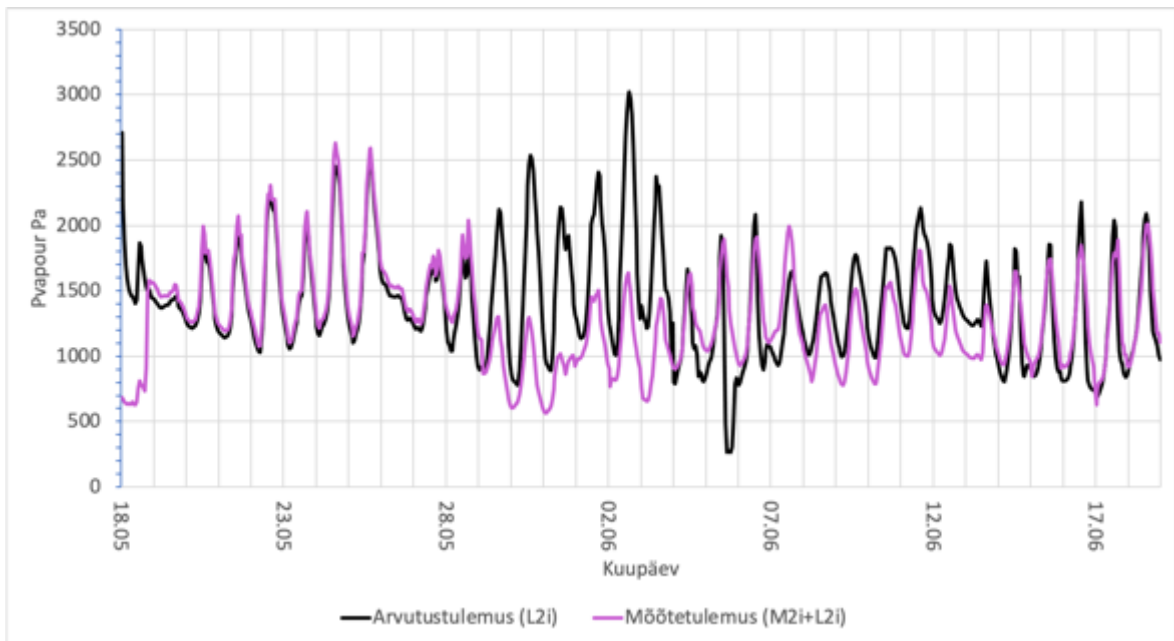
Joonis L2.9 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis M1e (arvutusmudelil L1e)



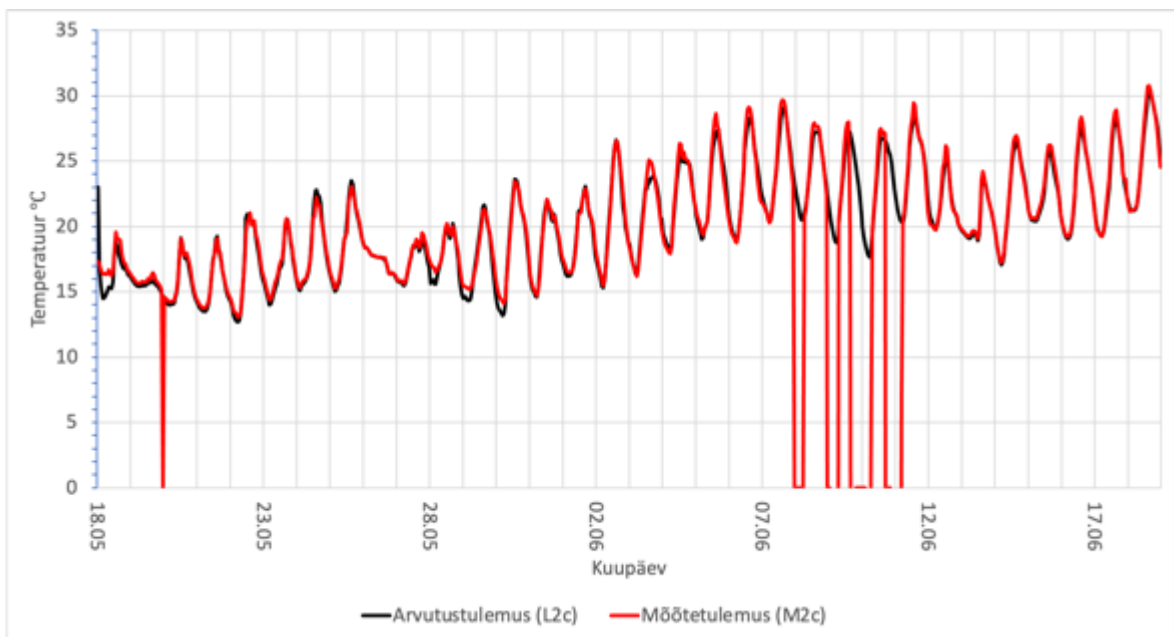
Joonis L2.10 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M2i (arvutusmudelil L2i)



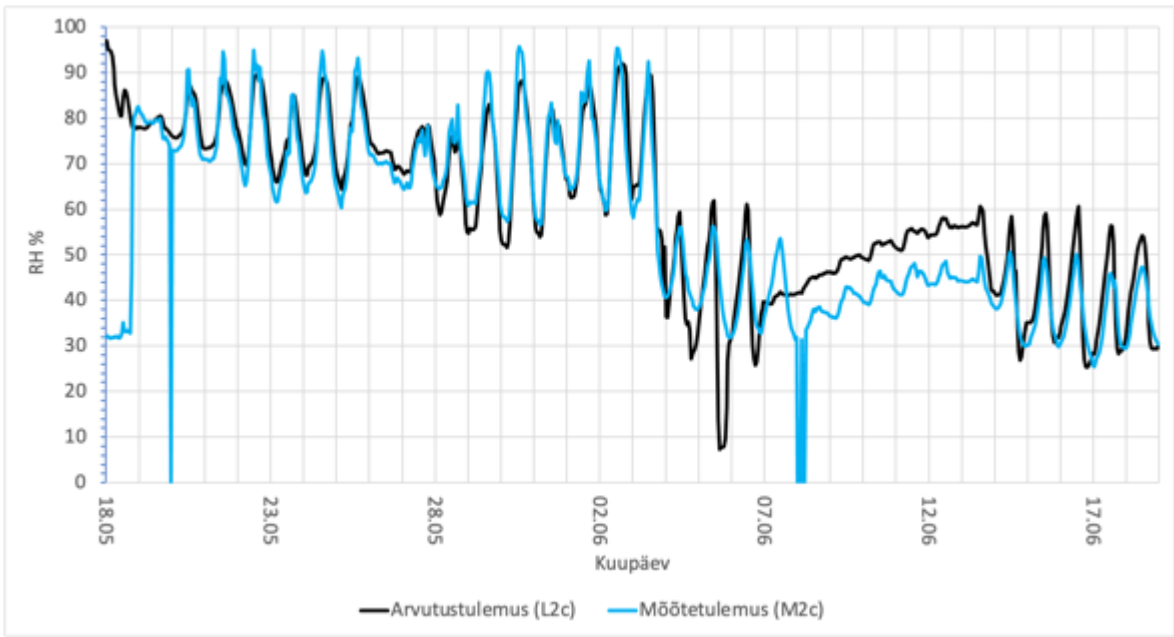
Joonis L2.11 mõõdetud suhteline niiskus punktis M2i (kuni 28.05) ja punktis L2i (alates 28.05) (arvutusmudelil L2i)



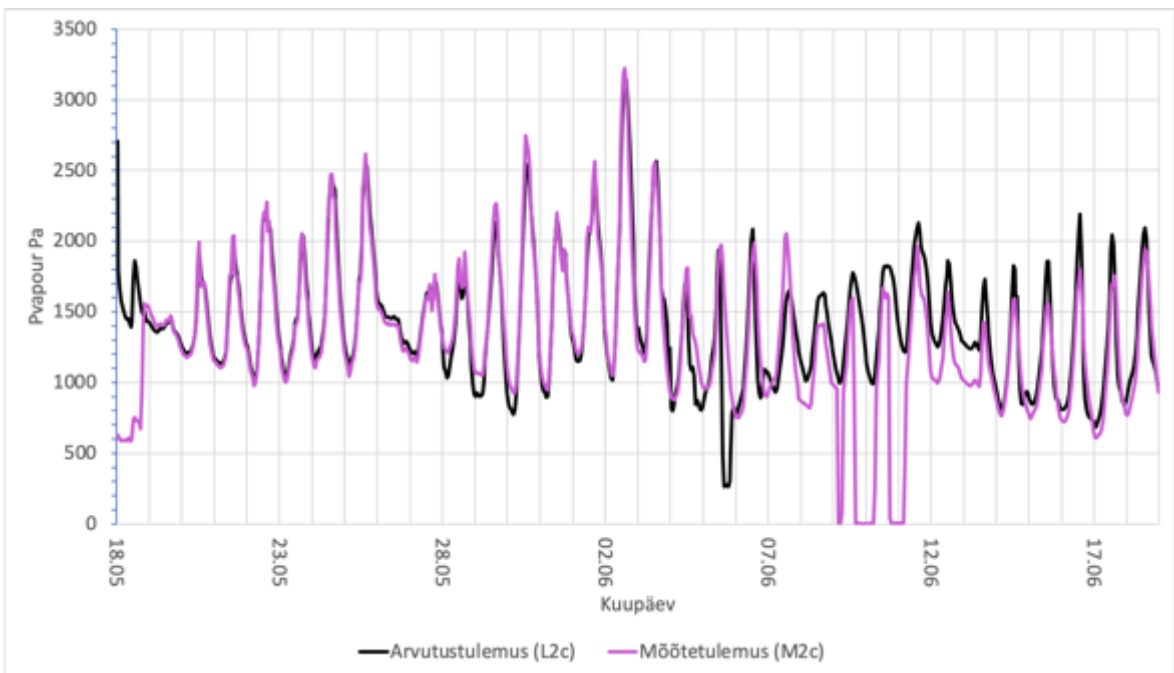
Joonis L2.12 mõõdetud veeauruosarõhk punktis M2i (kuni 28.05) ja punktis L2i (alates 28.05) (arvutusmudelil L2i)



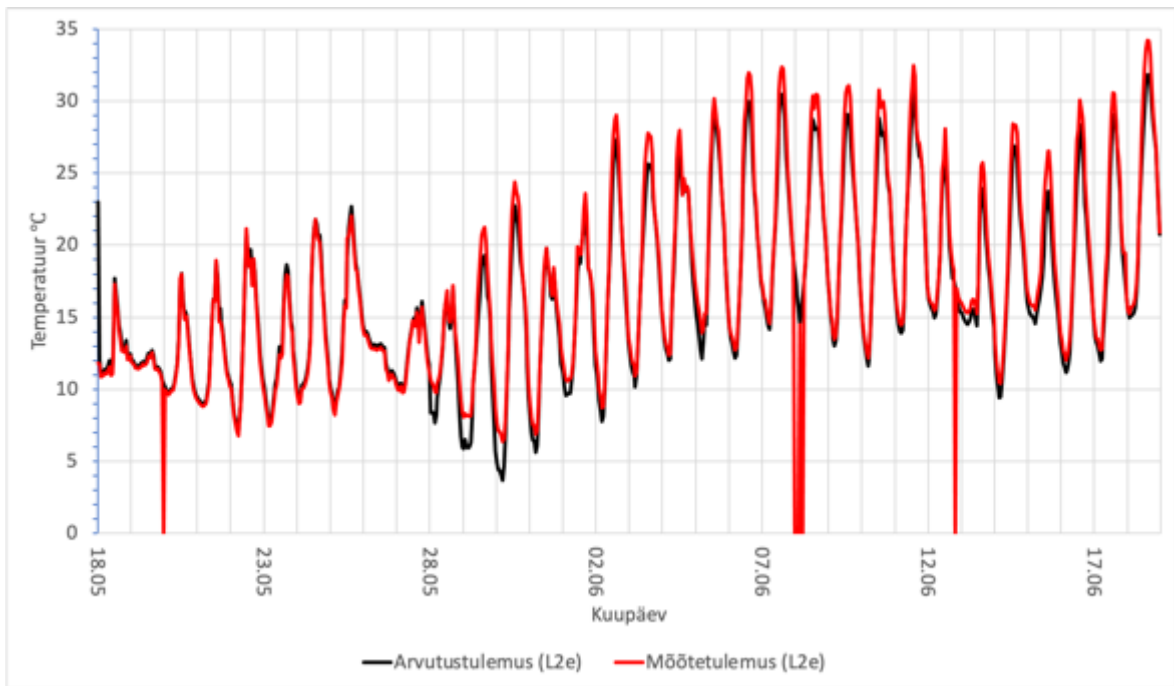
Joonis L2.13 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M2c (arvutusmudelil L2c)



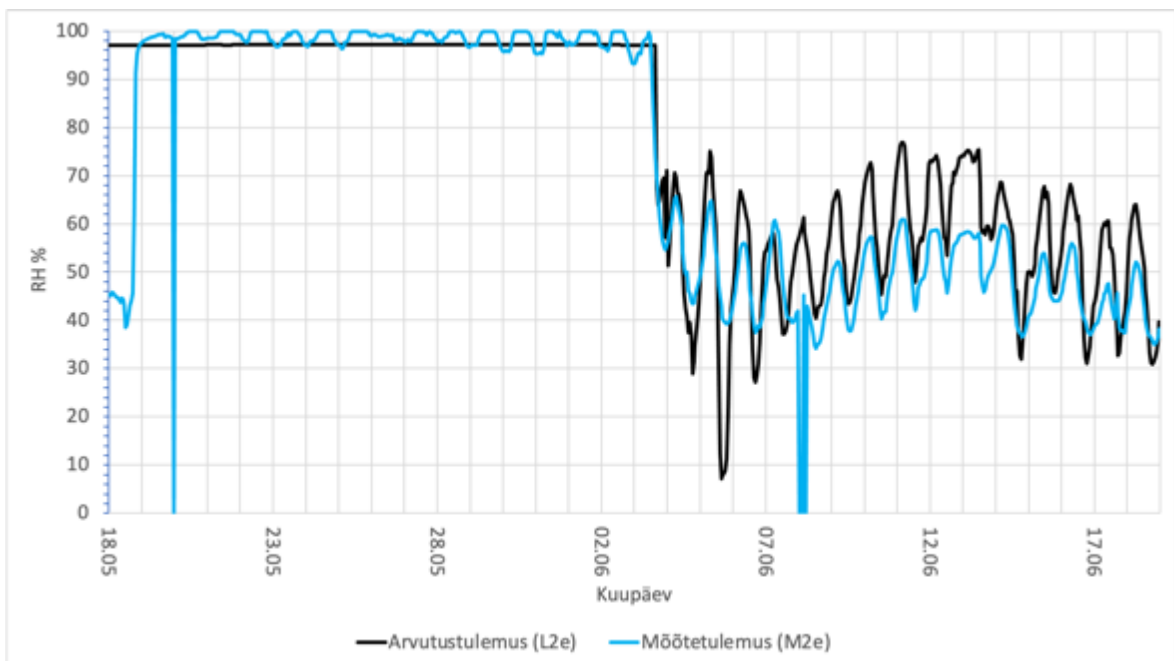
Joonis L2.14 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M2c (arvutusmudelil L2c)



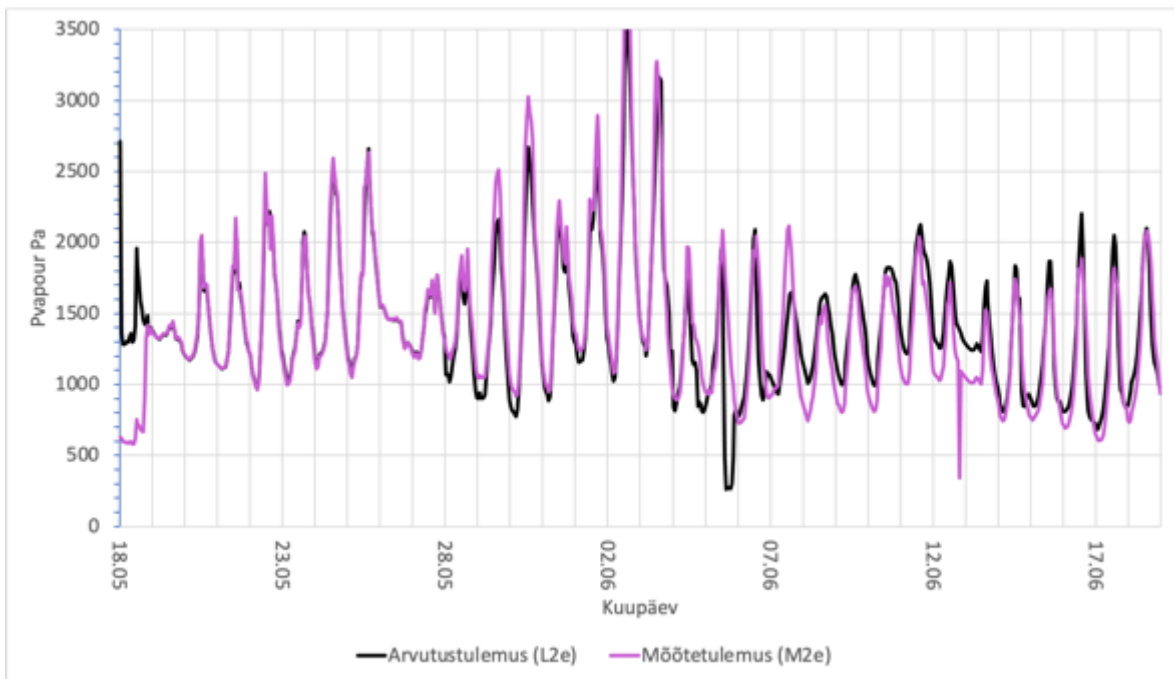
Joonis L2.15 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis M2c (arvutusmudelil L2c)



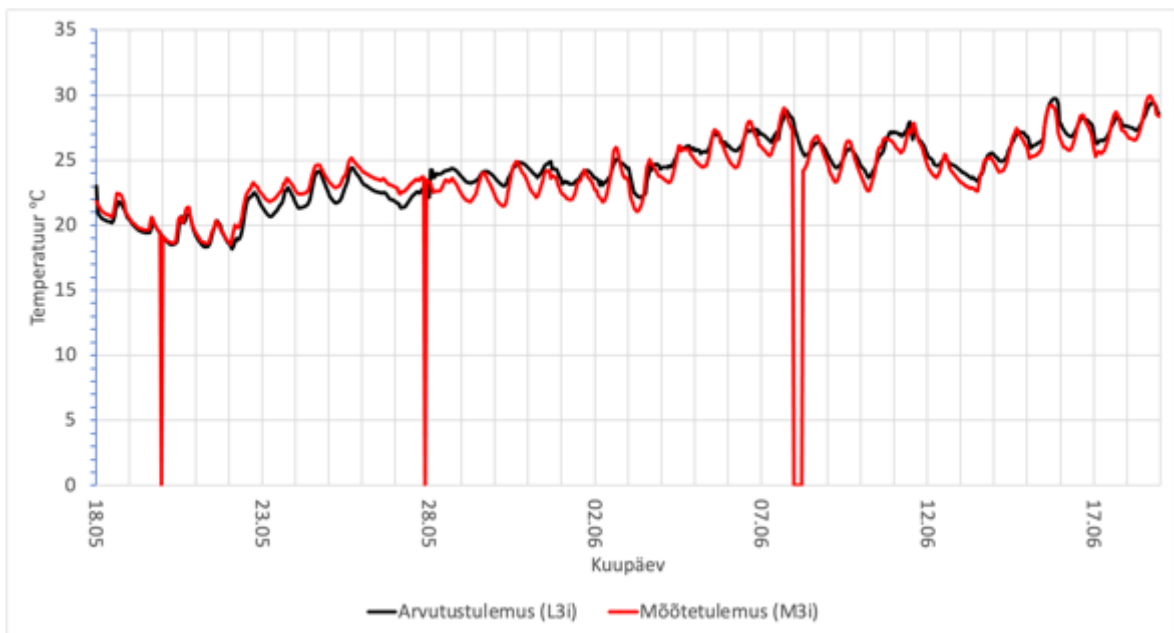
Joonis L2.16 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis L2e (arvutusmudelil L2e)



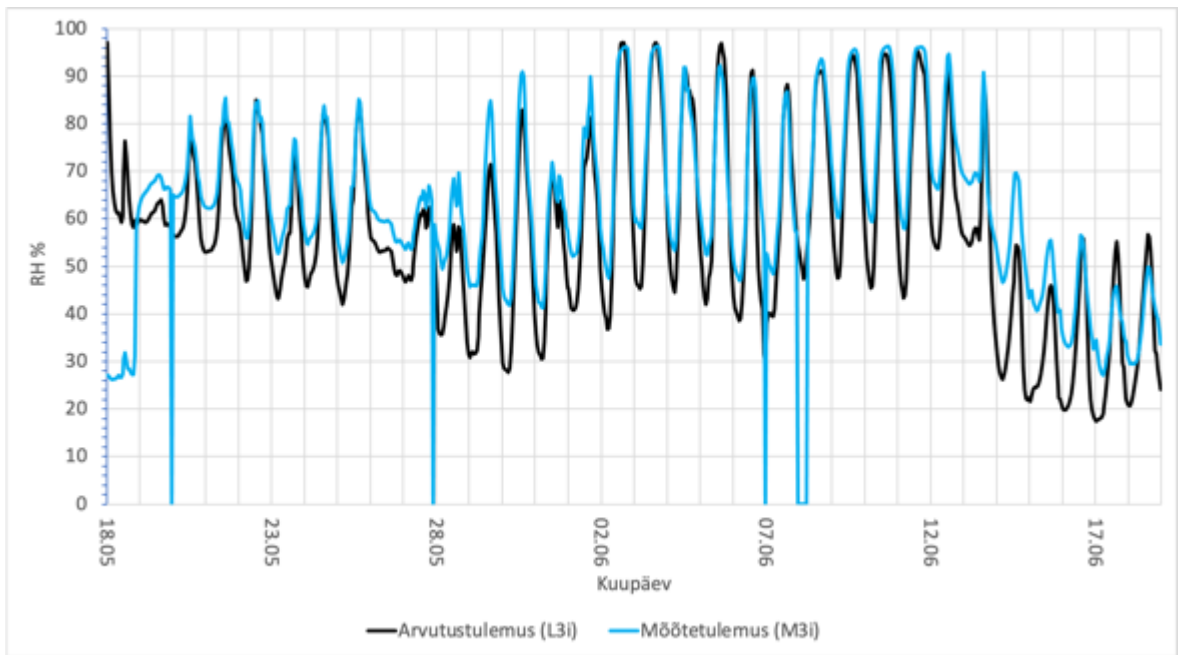
Joonis L2.17 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M2e (arvutusmudelil L2e)



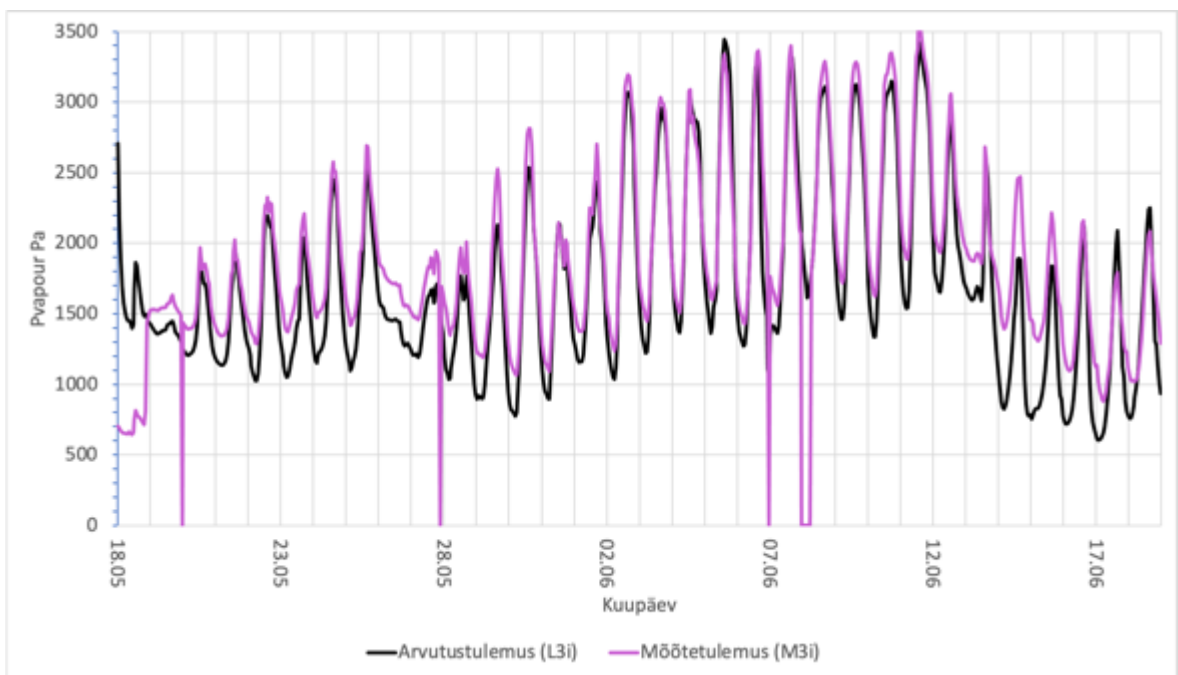
Joonis L2.18 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis M2e (arvutusmudelil L2e)



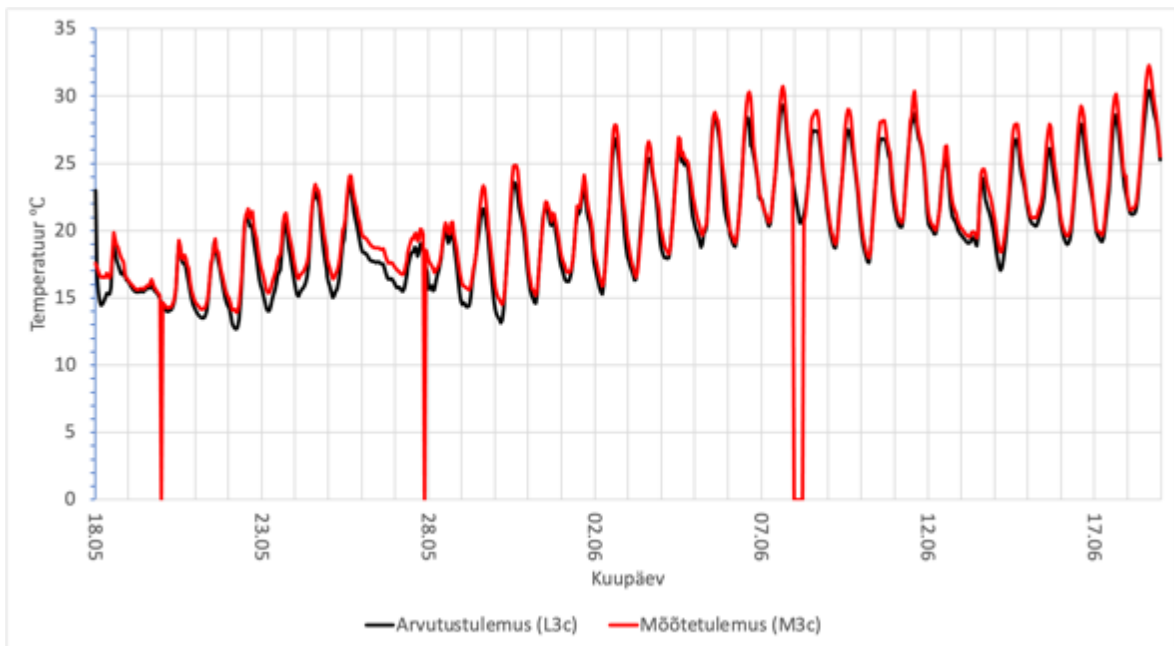
Joonis L2.19 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M3i (arvutusmudelil L3i)



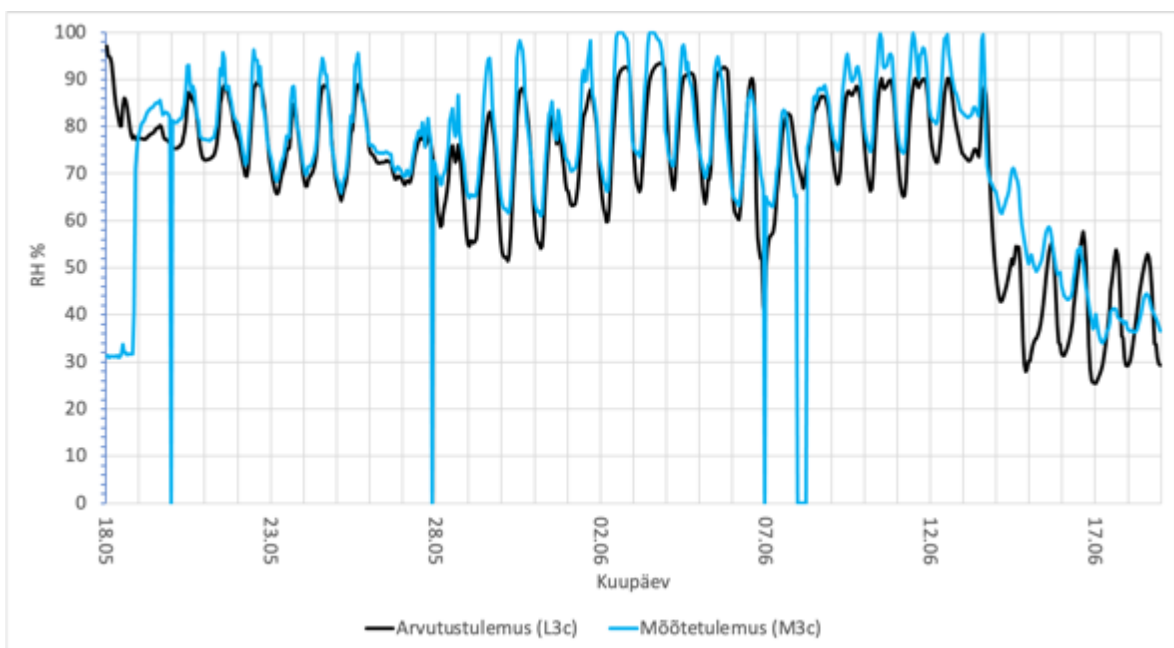
Joonis L2.20 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M3i (arvutusmudelil L3i)



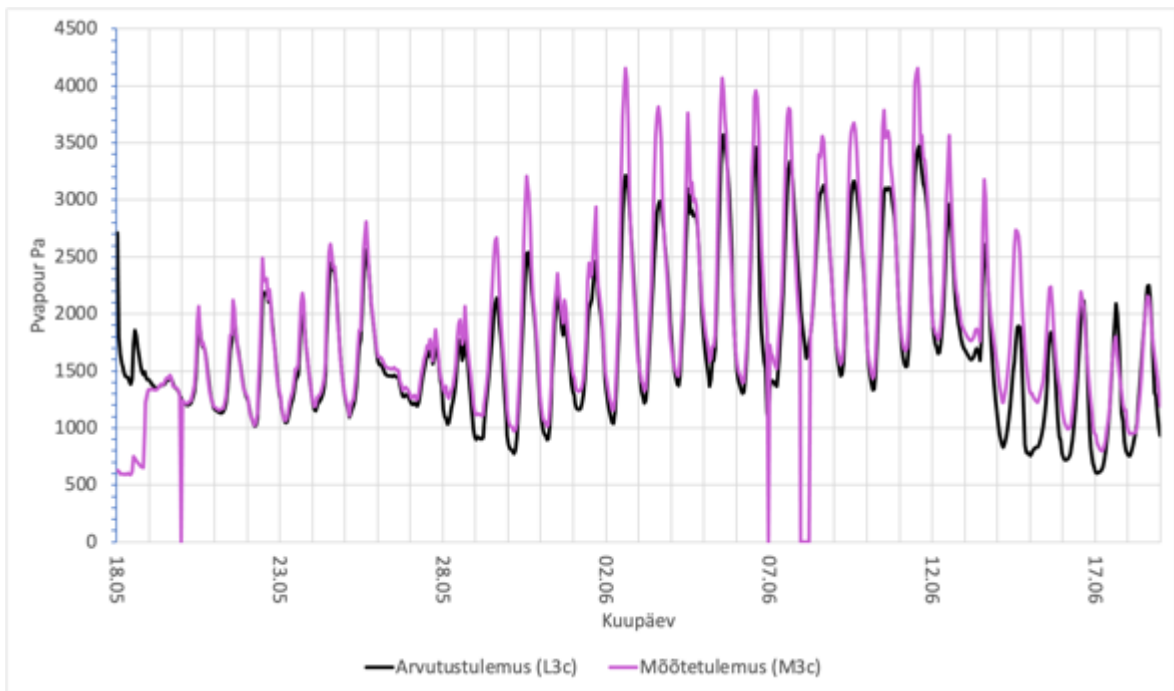
Joonis L2.21 mõõdetud ja arvutatud veeaurusarõhk punktis M3i (arvutusmudelil L3i)



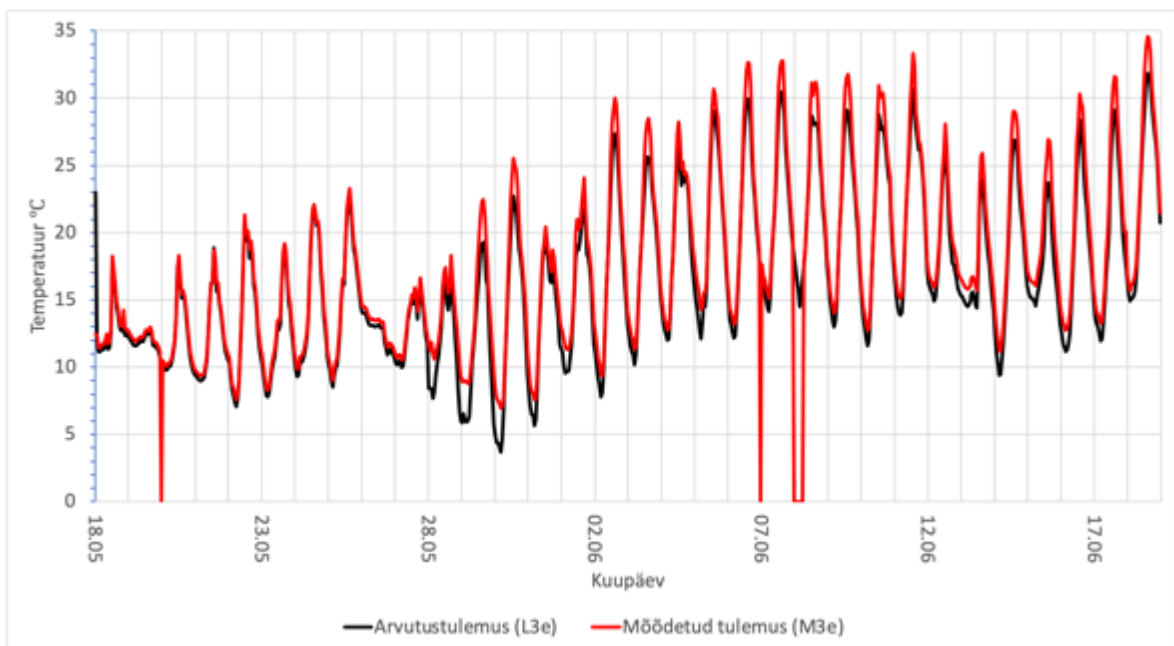
Joonis L2.22 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M3c (arvutusmudelil L3c)



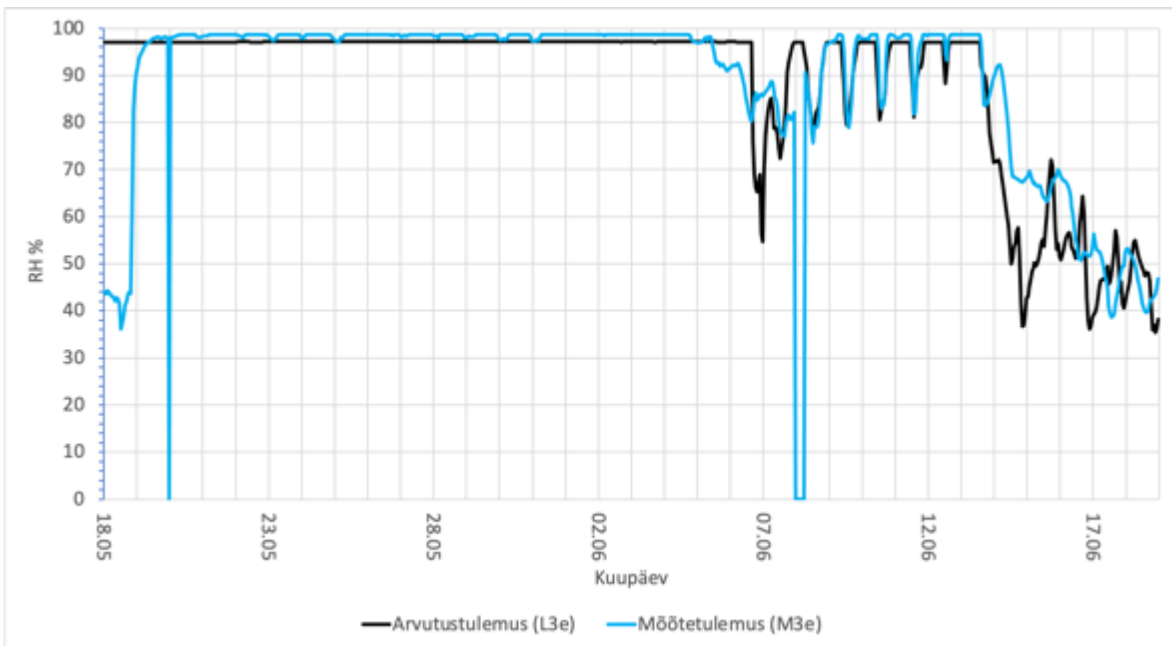
Joonis L2.23 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M3c (arvutusmudelil L3c)



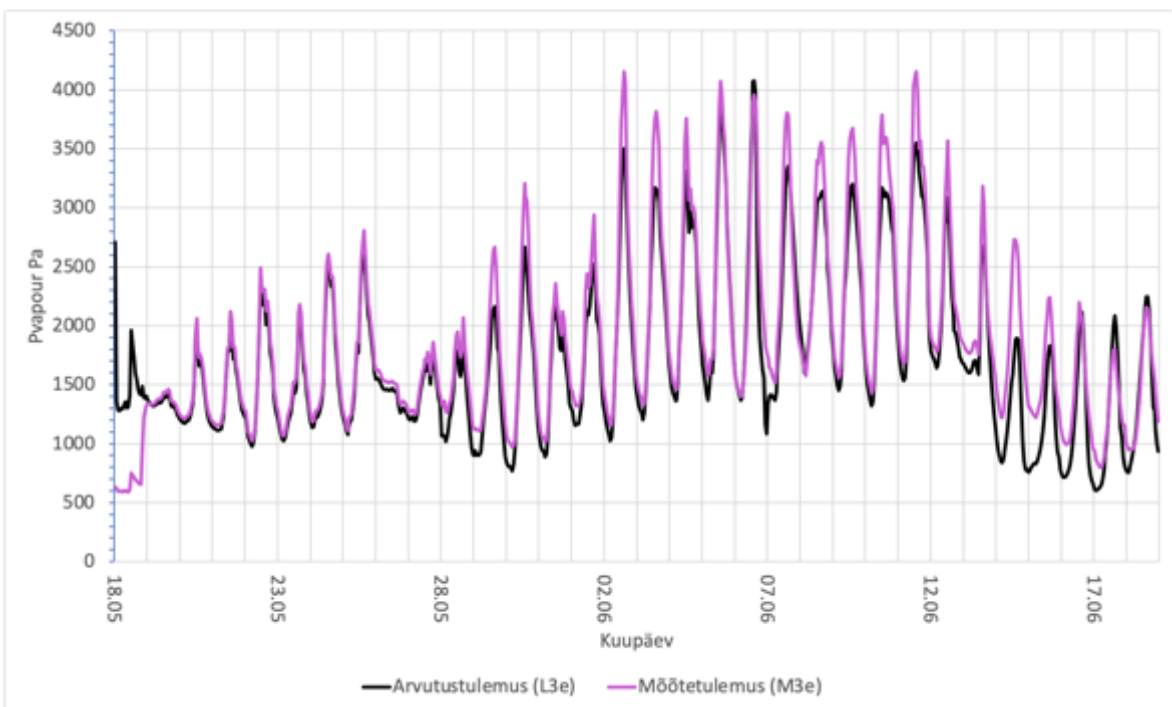
Joonis L2.24 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis M3c (arvutusmudelil L3c)



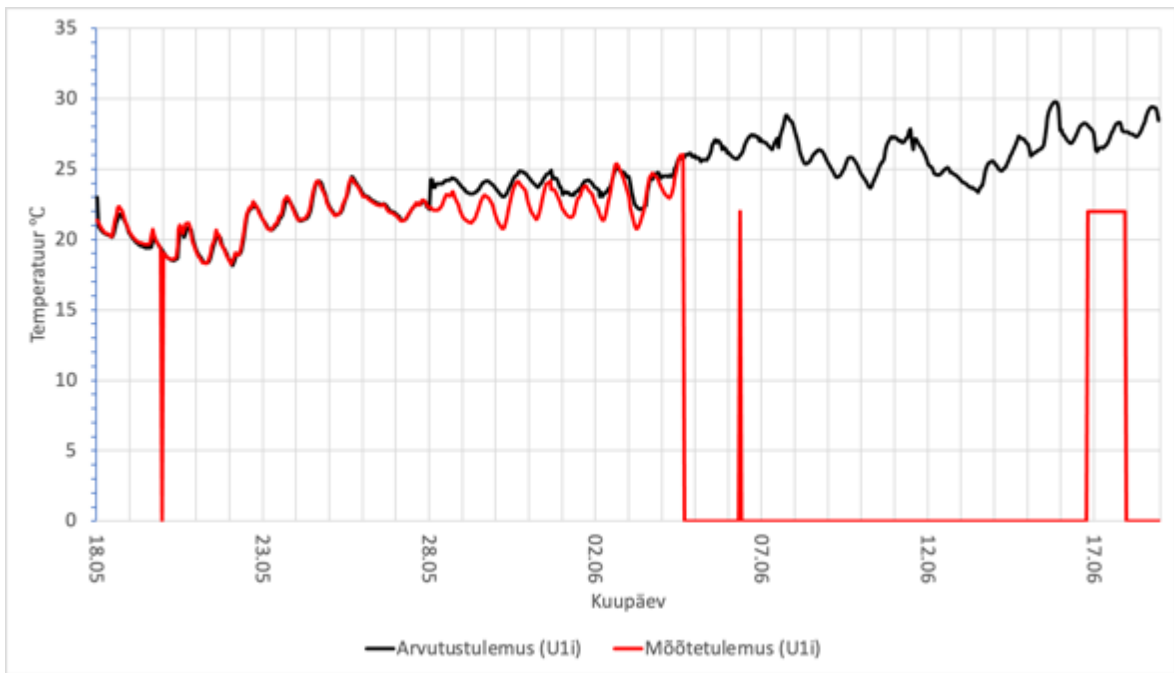
Joonis L2.25 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis M3e (arvutusmudelil L3e)



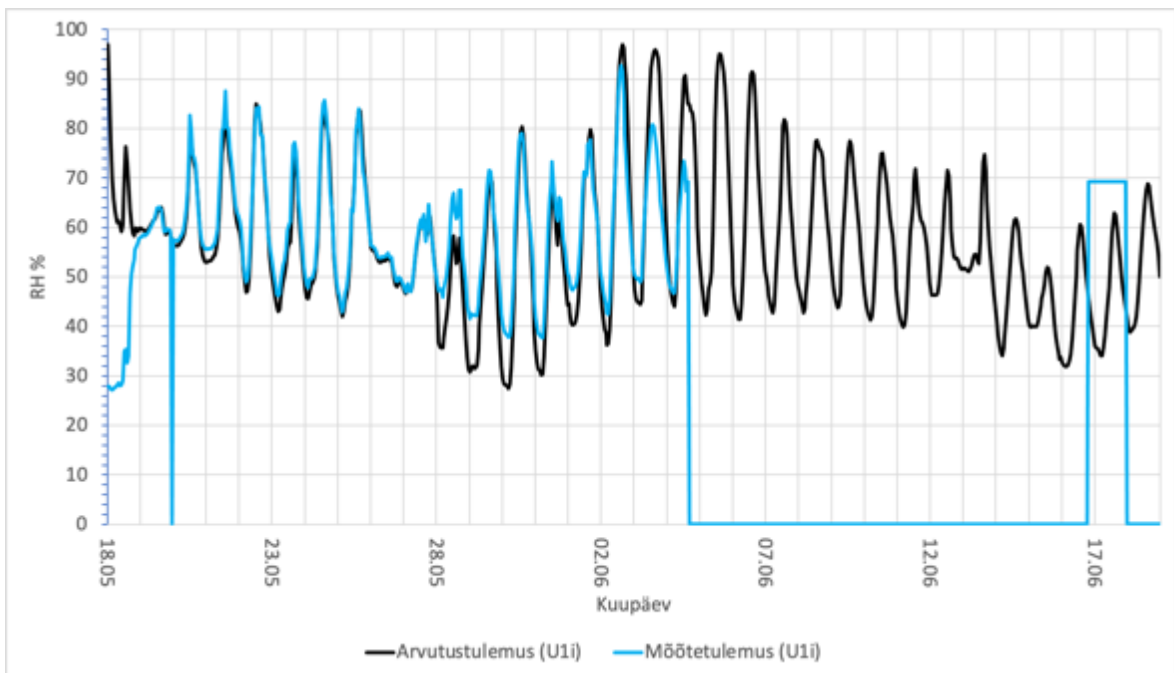
Joonis L2.26 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis M3e (arvutusmudelil L3e)



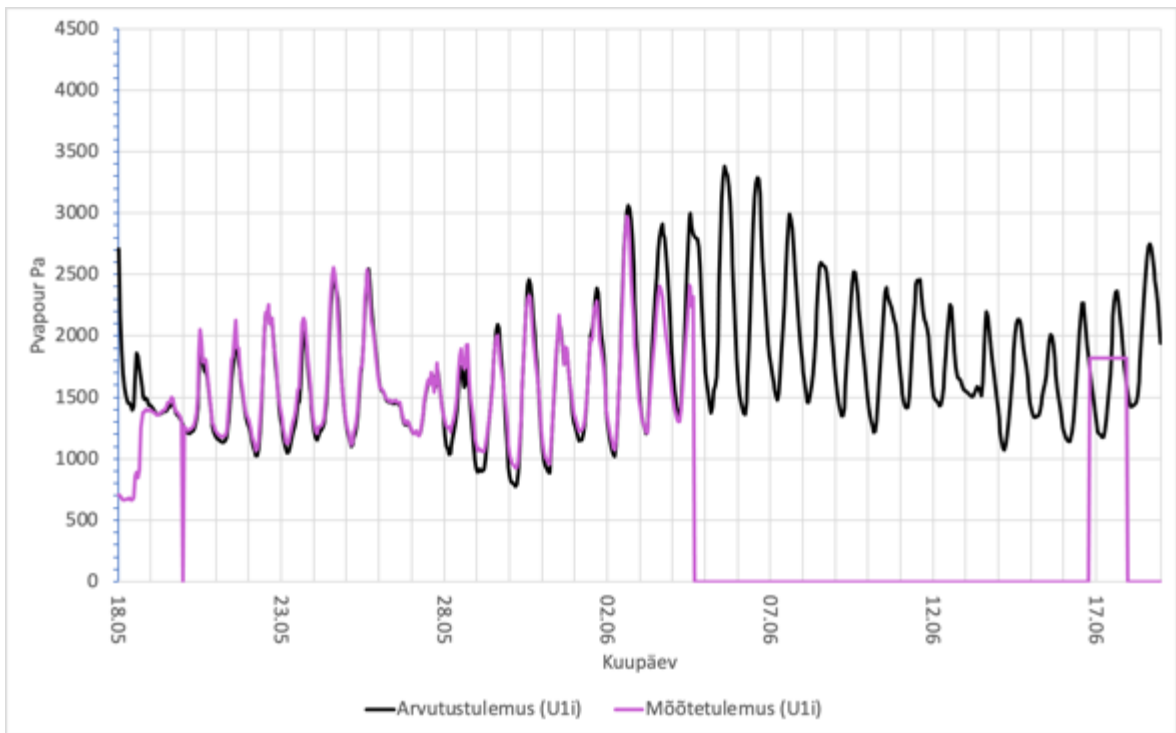
Joonis L2.27 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis M3e (arvutusmudelil L3e)



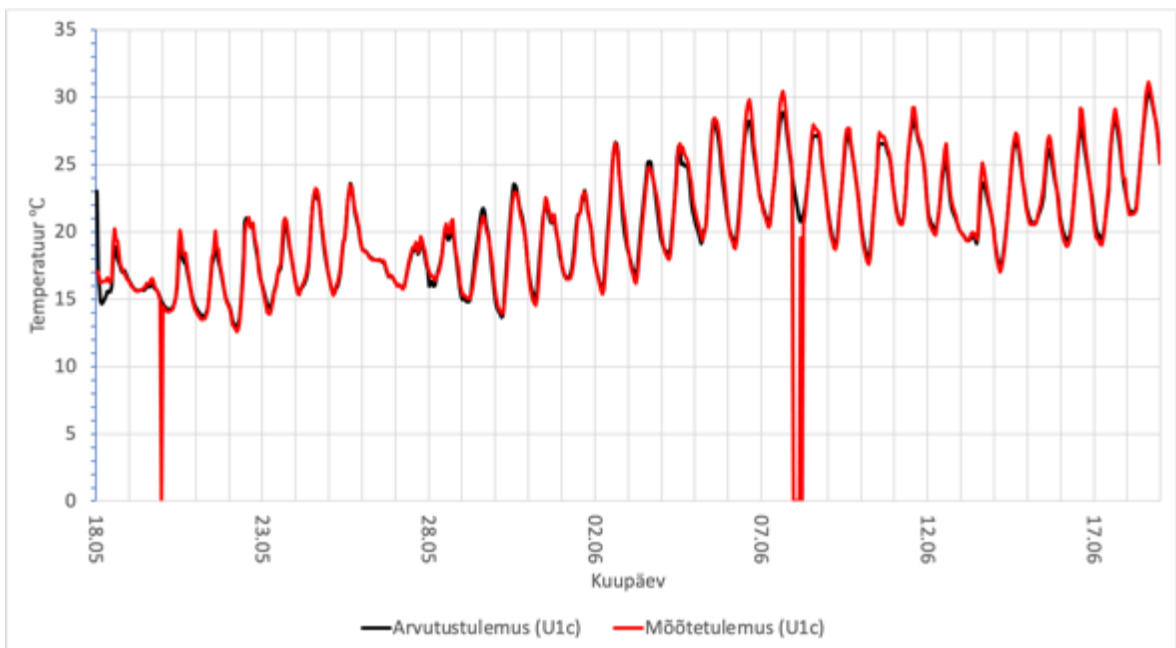
Joonis L2.28 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U1i



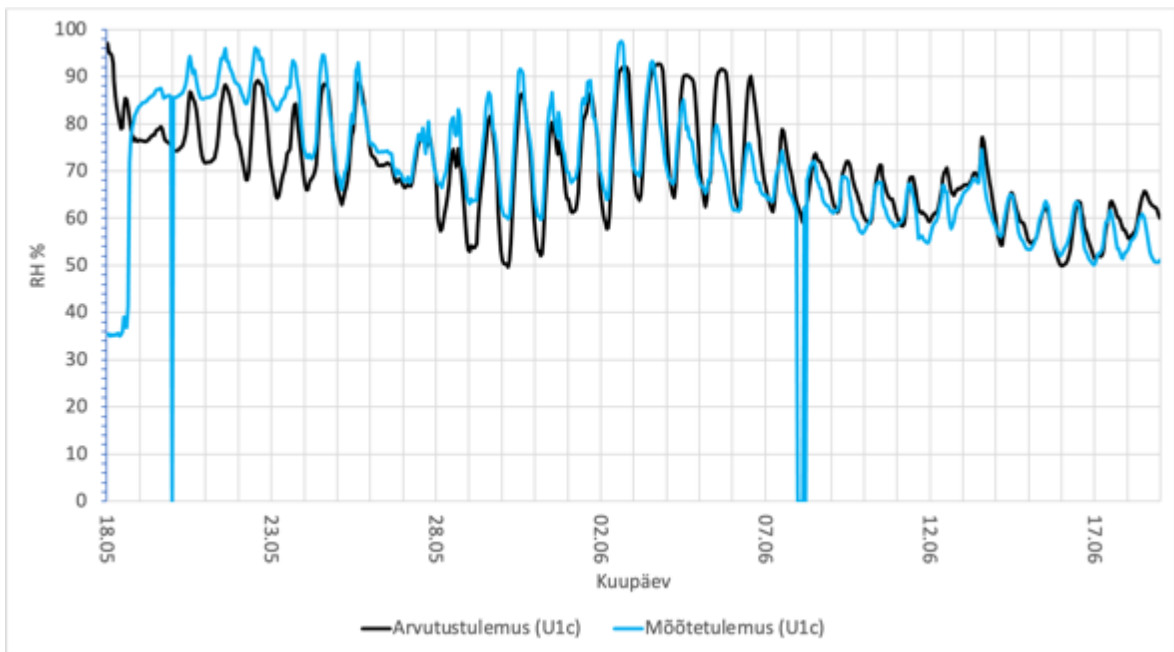
Joonis L2.29 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U1i



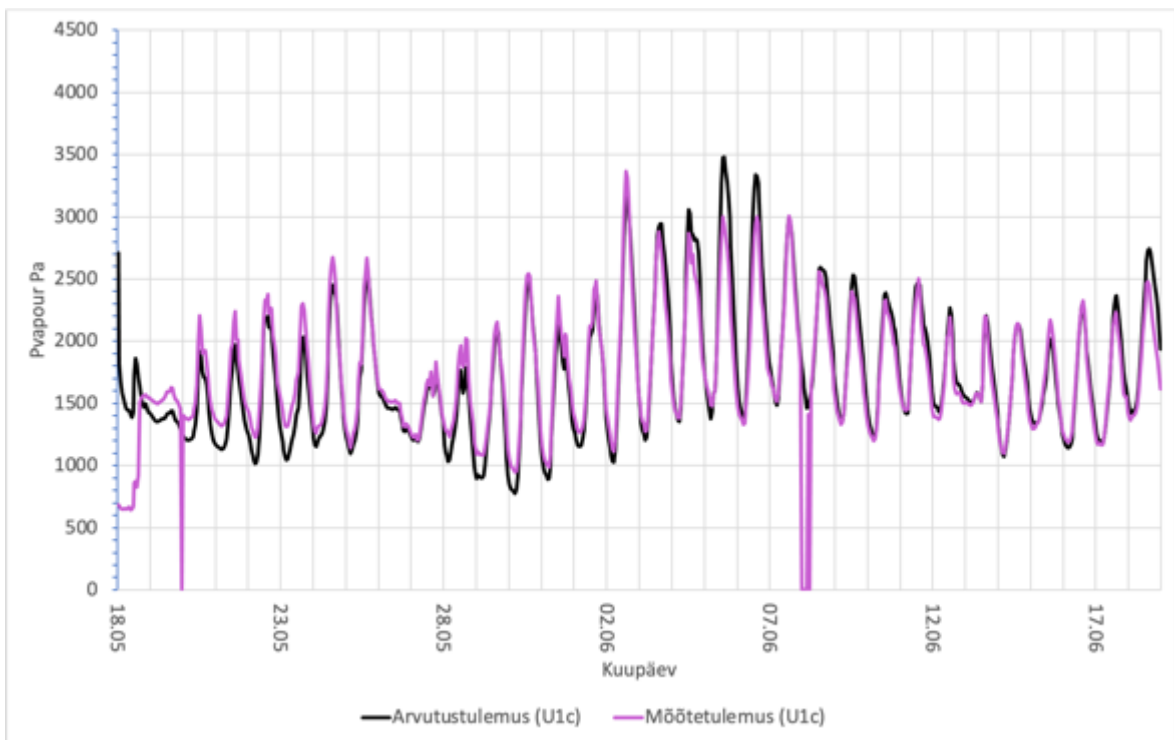
Joonis L2.30 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U1i



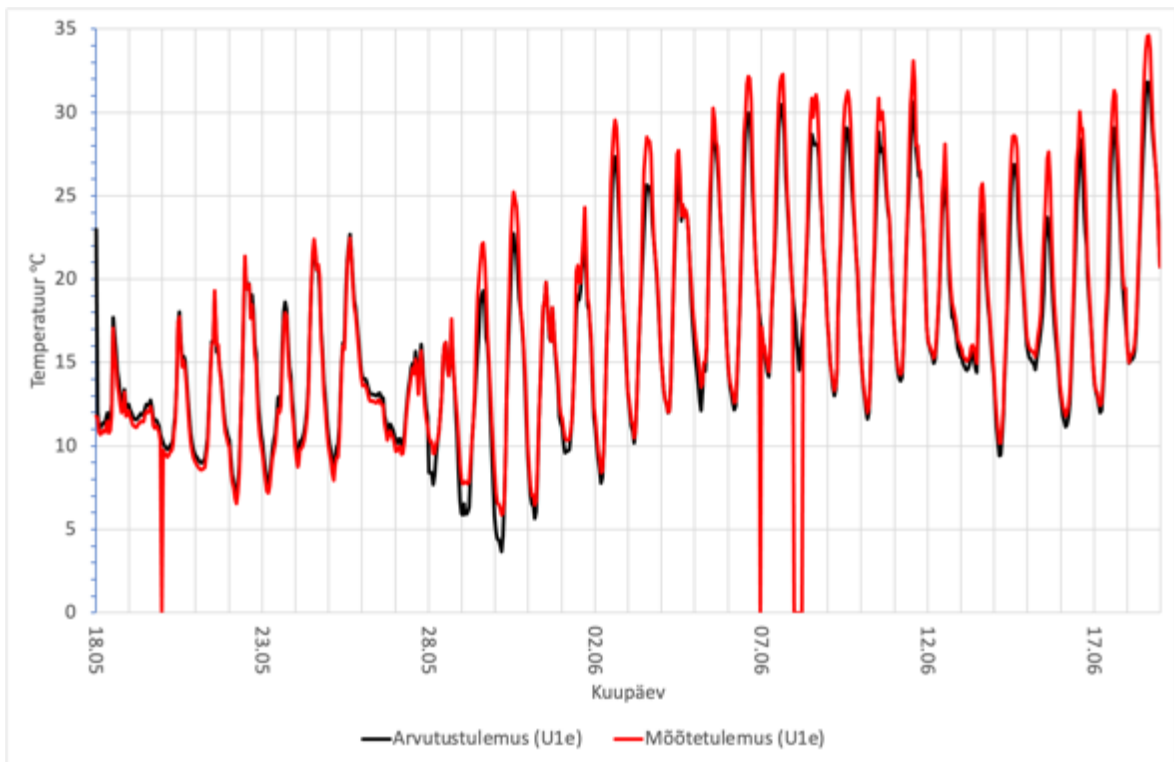
Joonis L2.31 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U1c



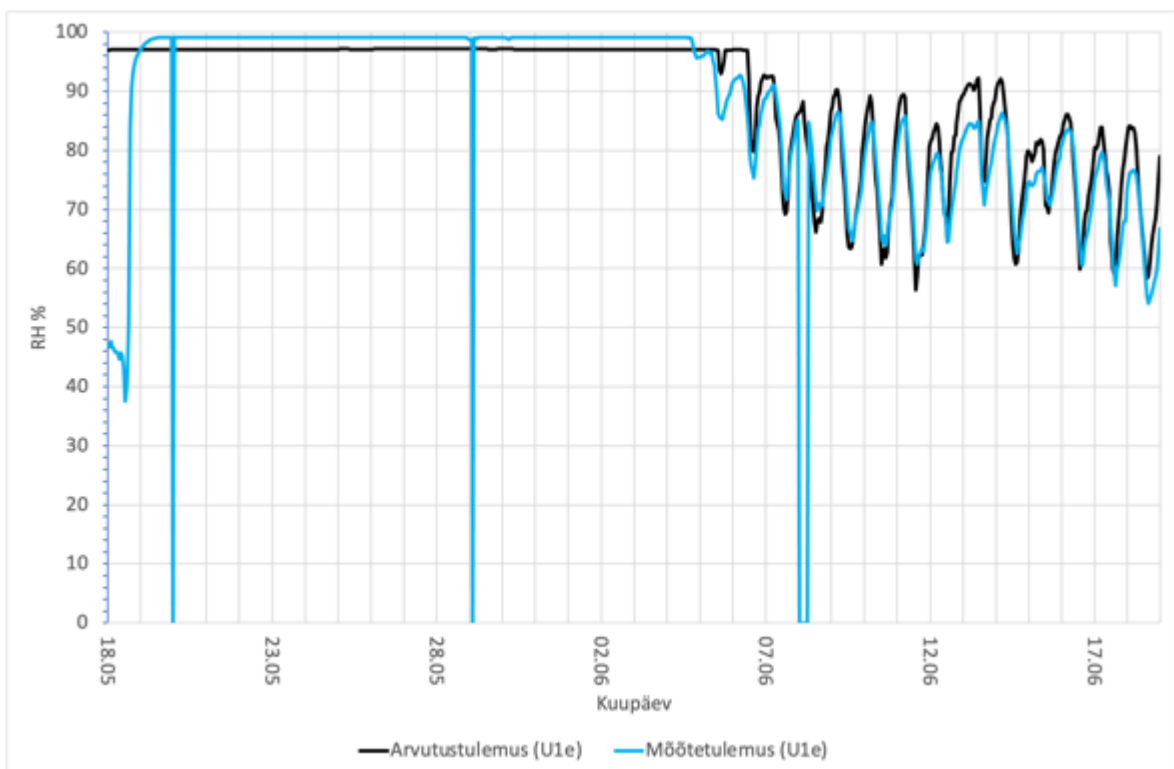
Joonis L2.32 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U1c



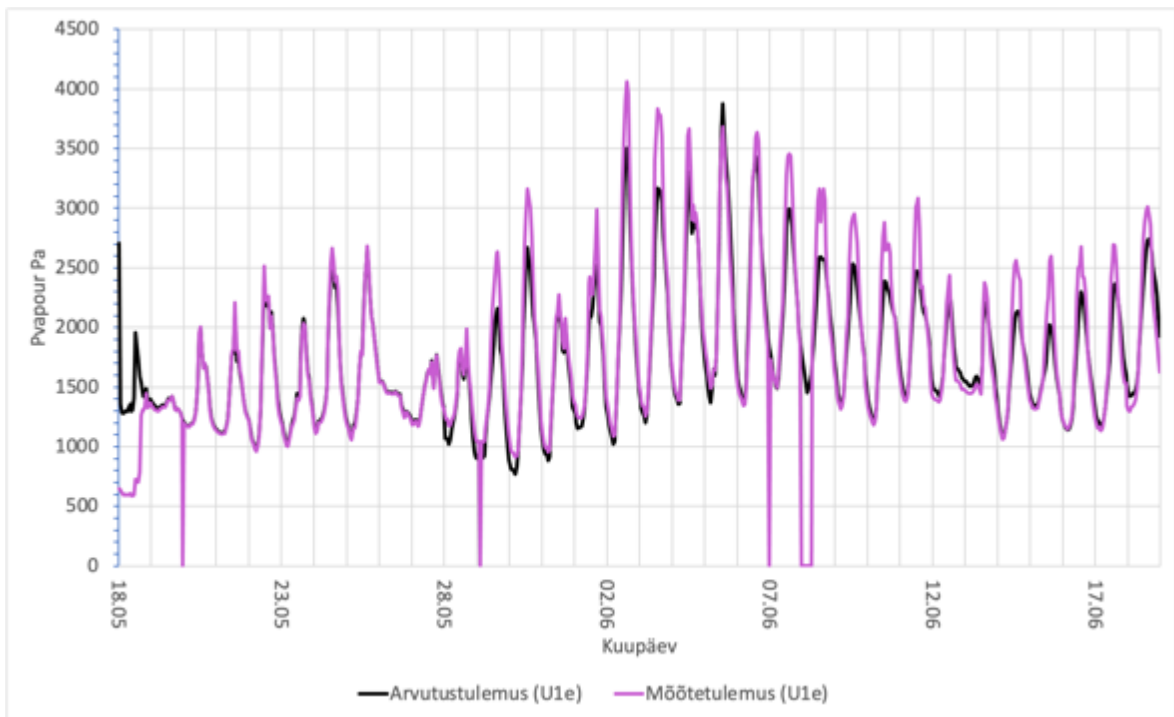
Joonis L2.33 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U1c



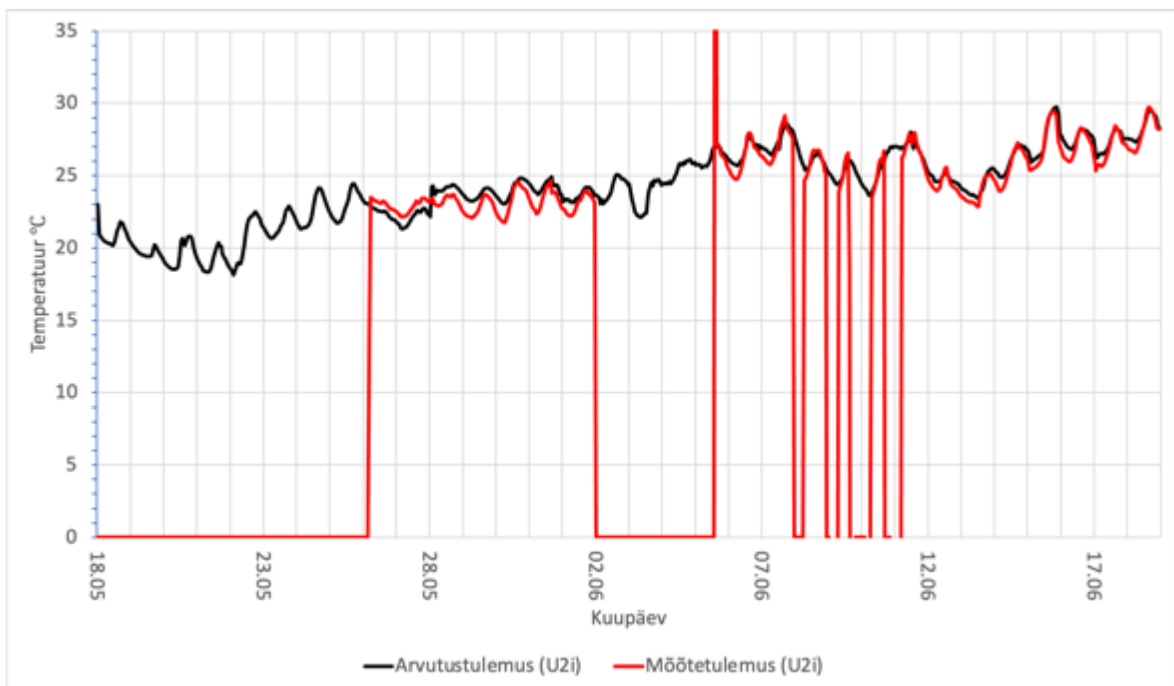
Joonis L2.34 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U1e



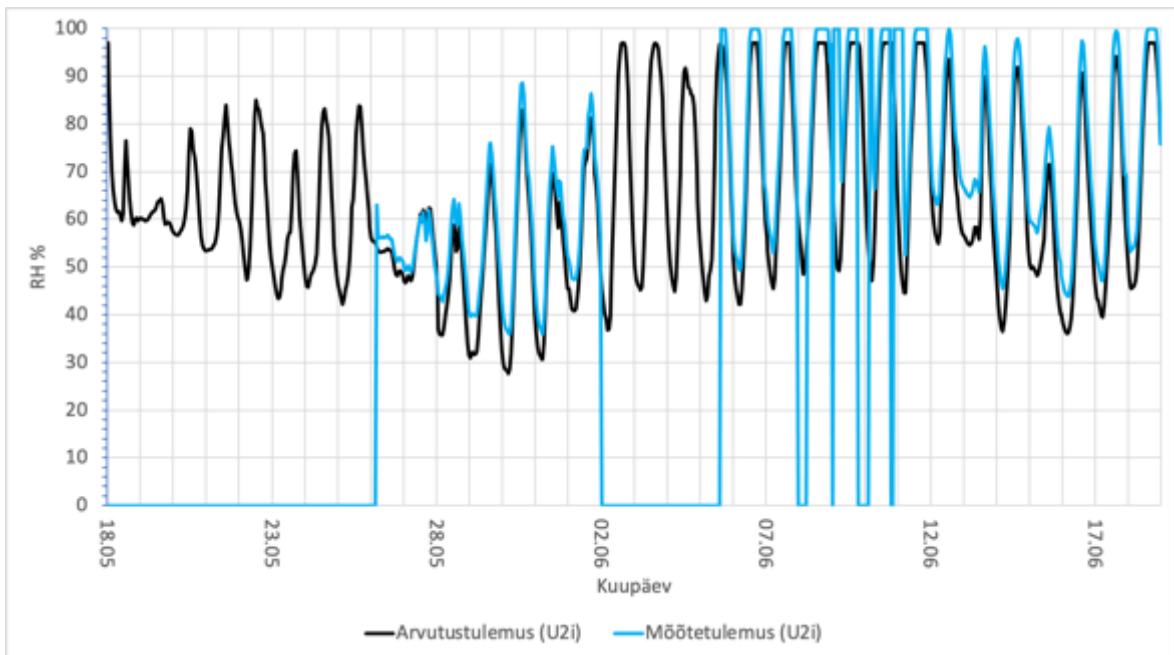
Joonis L2.35 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U1e



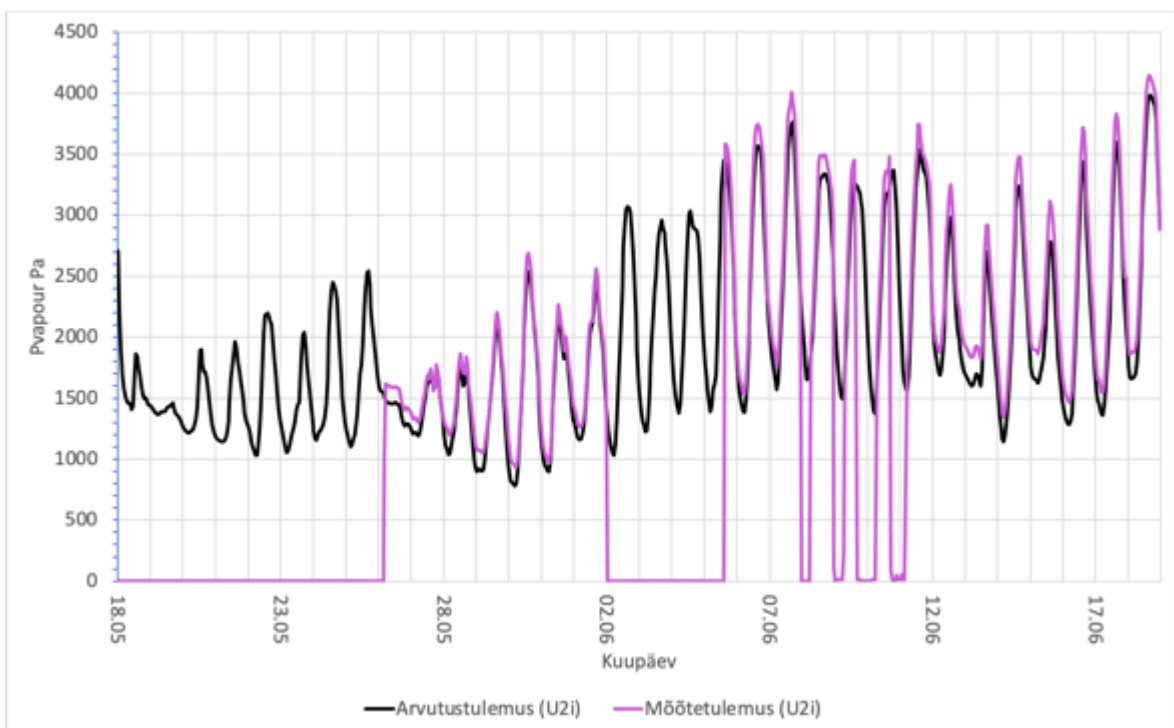
Joonis L2.36 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U1e



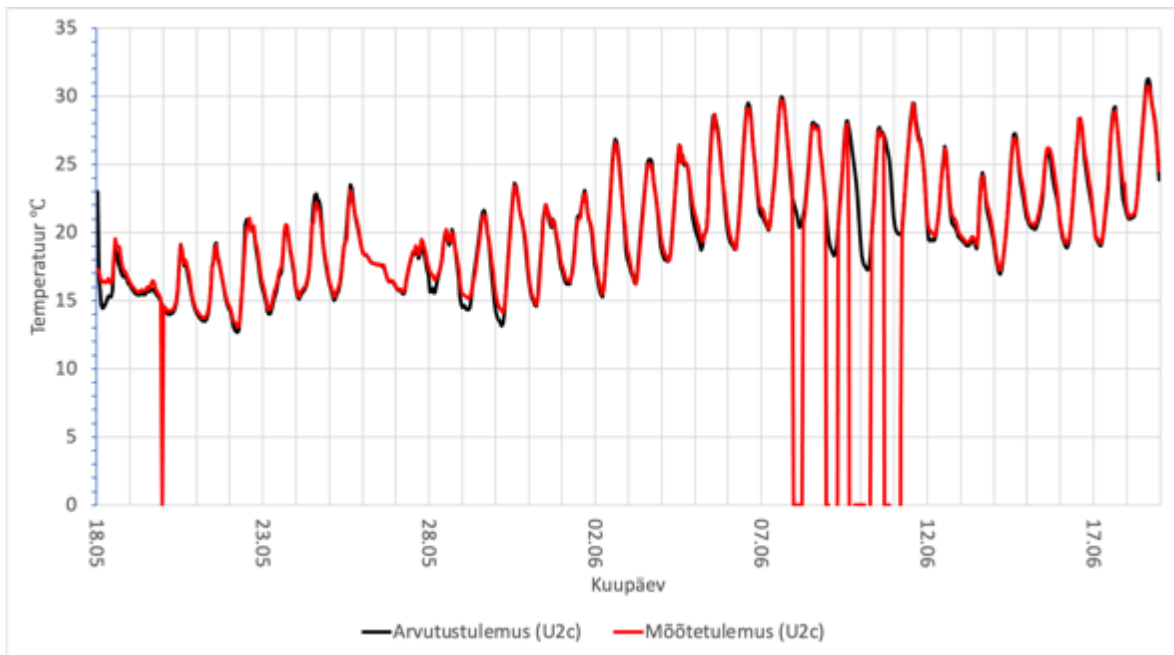
Joonis L2.37 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U2i



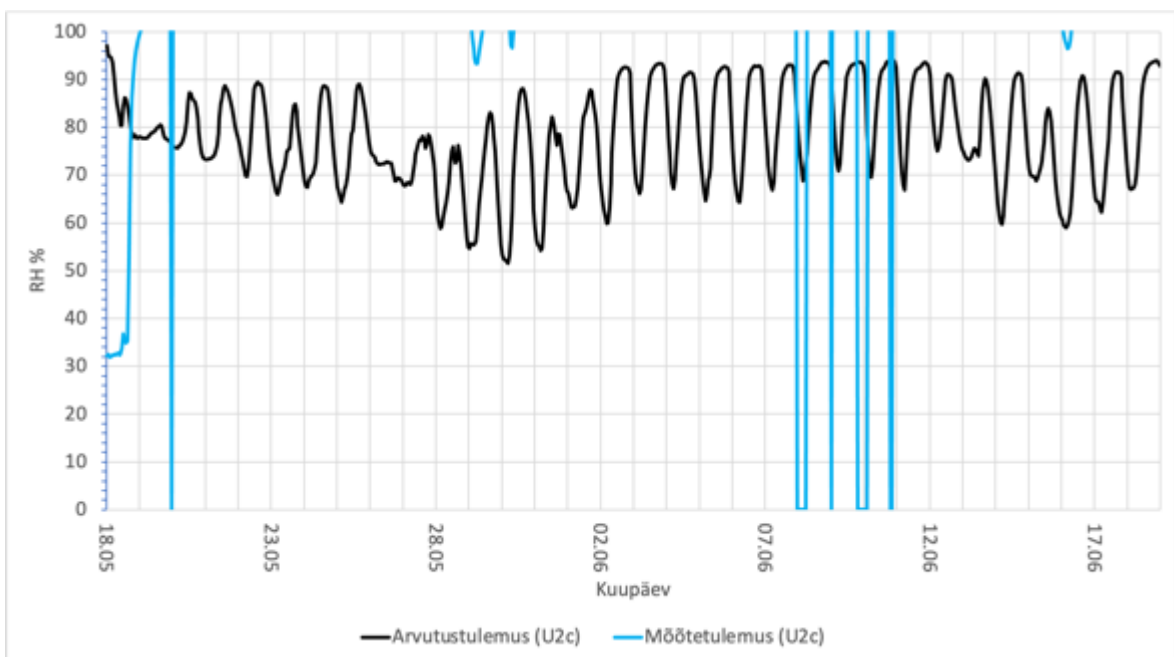
Joonis L2.38 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U2i



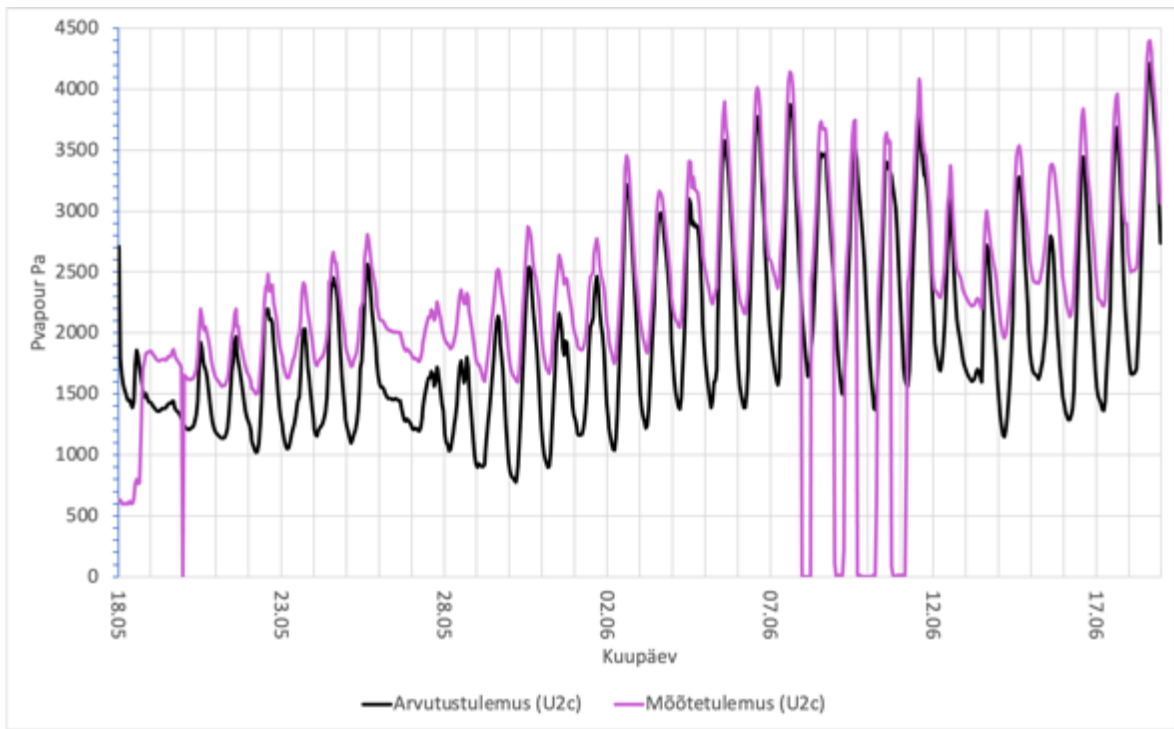
Joonis L2.39 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U2i



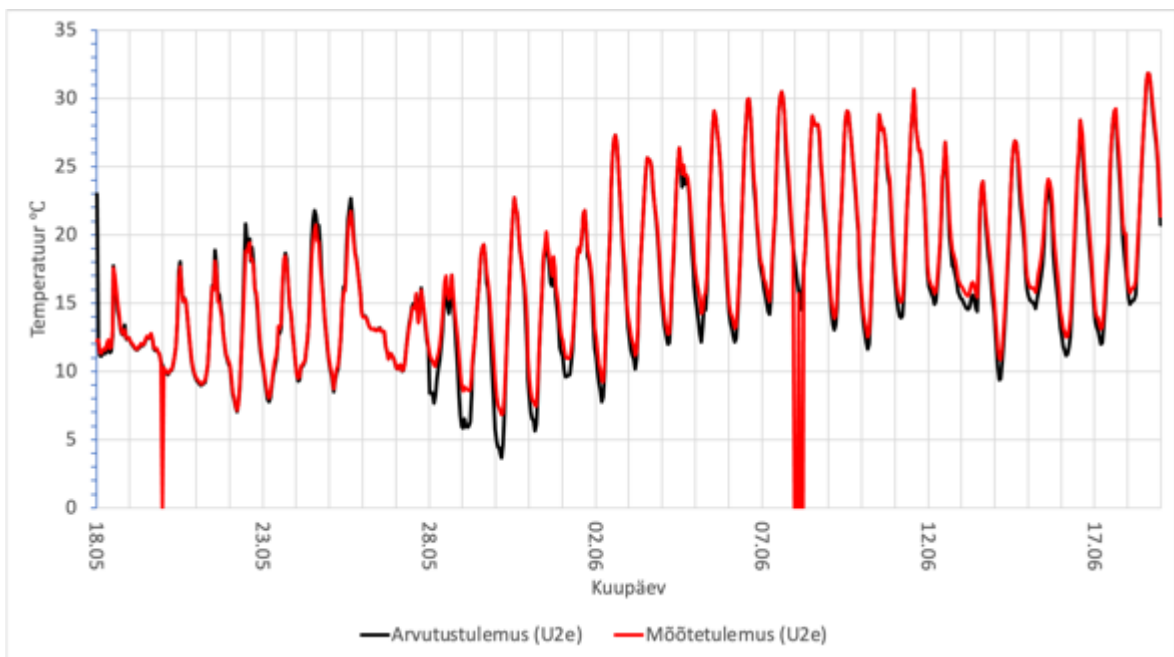
Joonis L2.40 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U2c



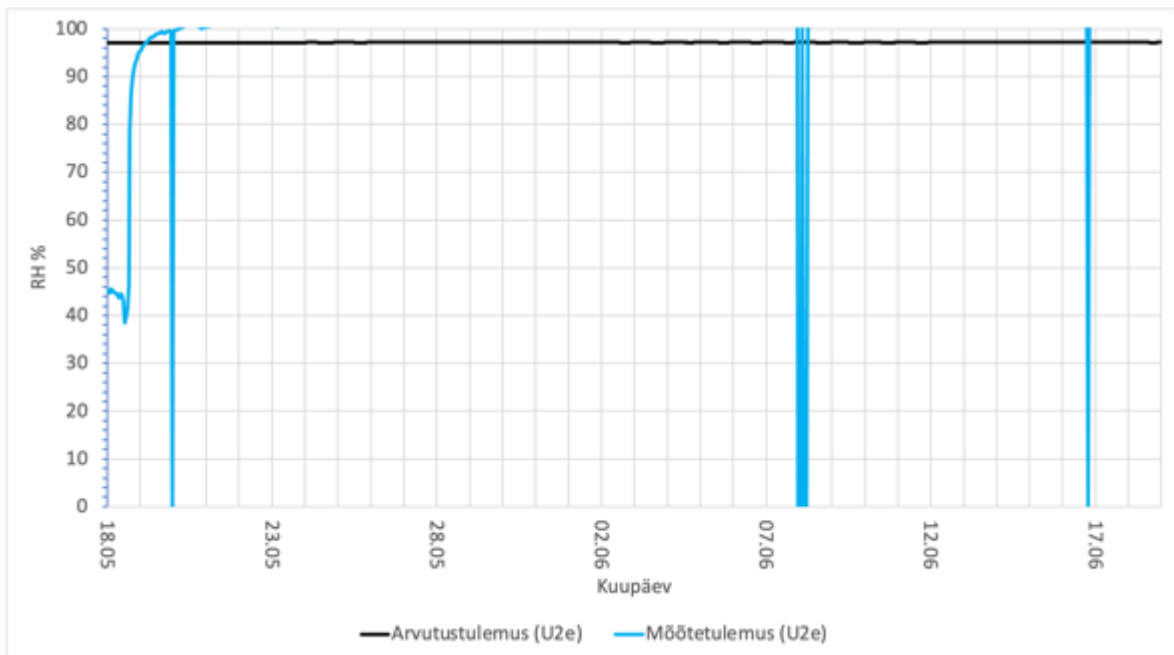
Joonis L2.41 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U2c



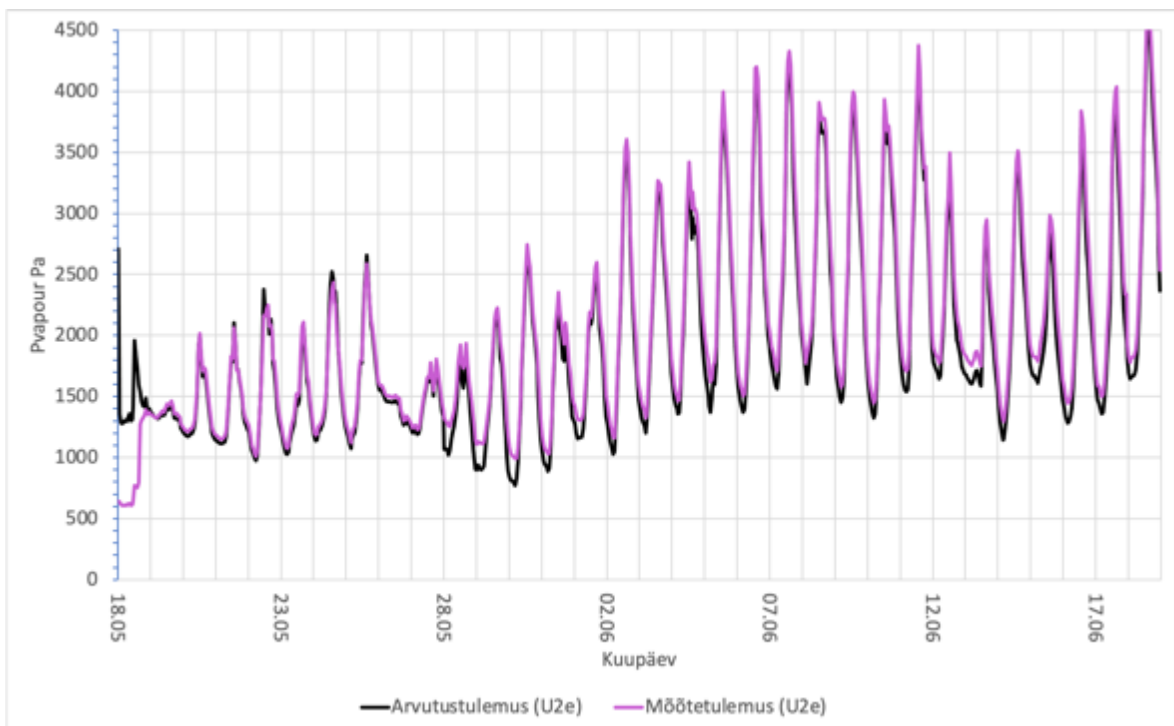
Joonis L2.42 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U2c



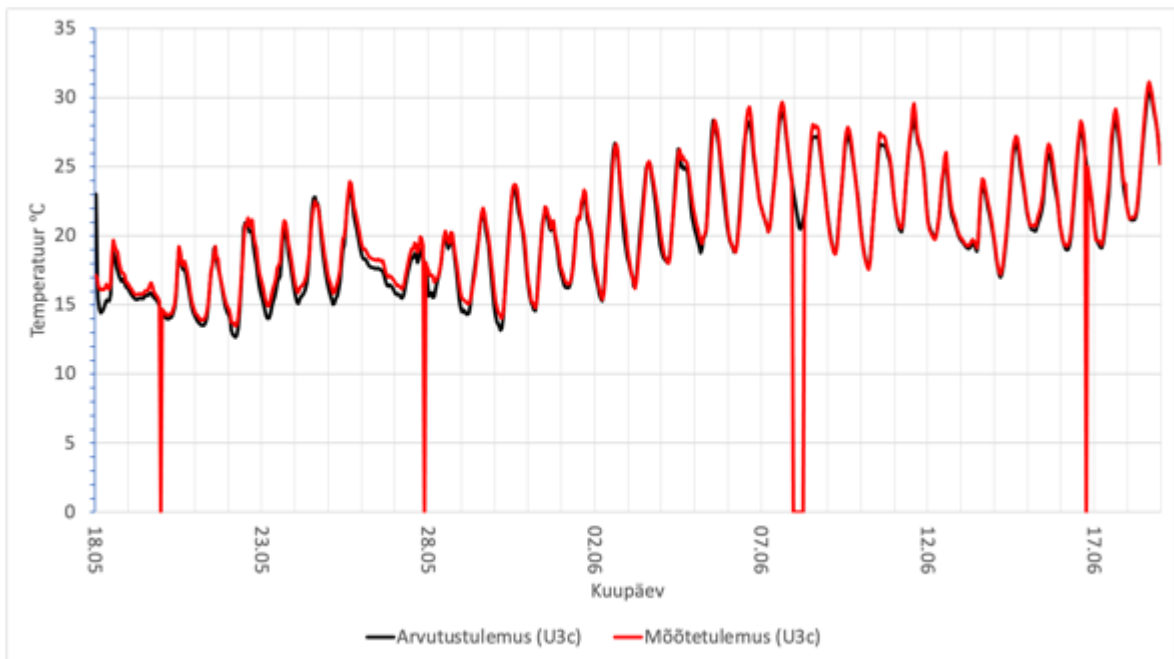
Joonis L2.43 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U2e



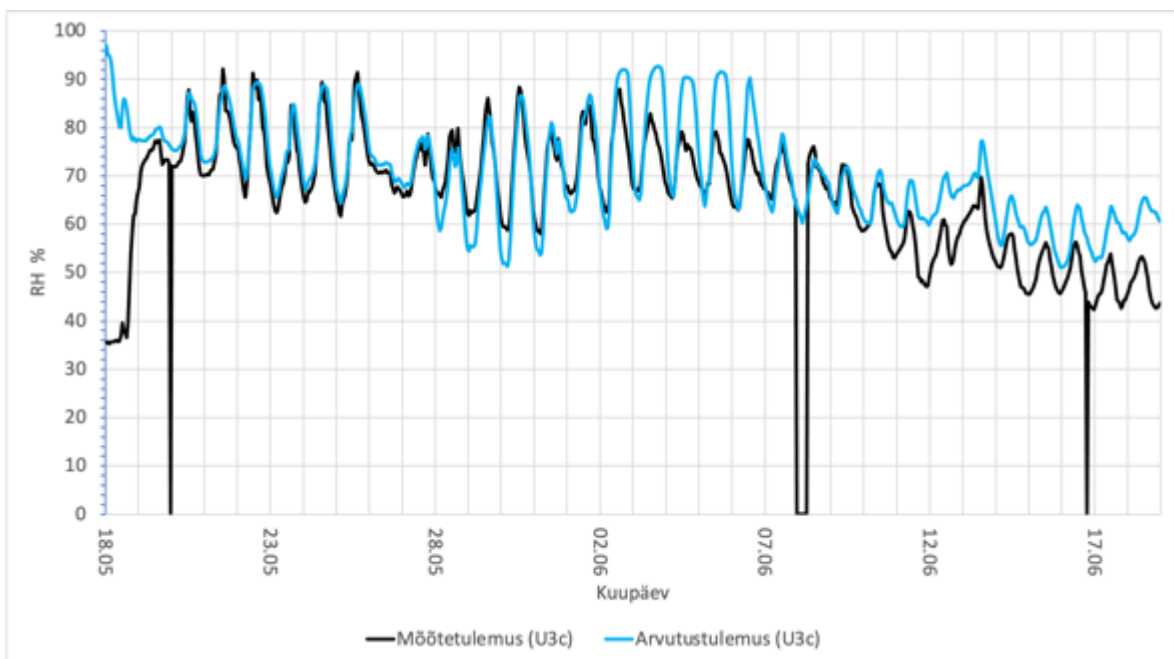
Joonis L2.44 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U2e



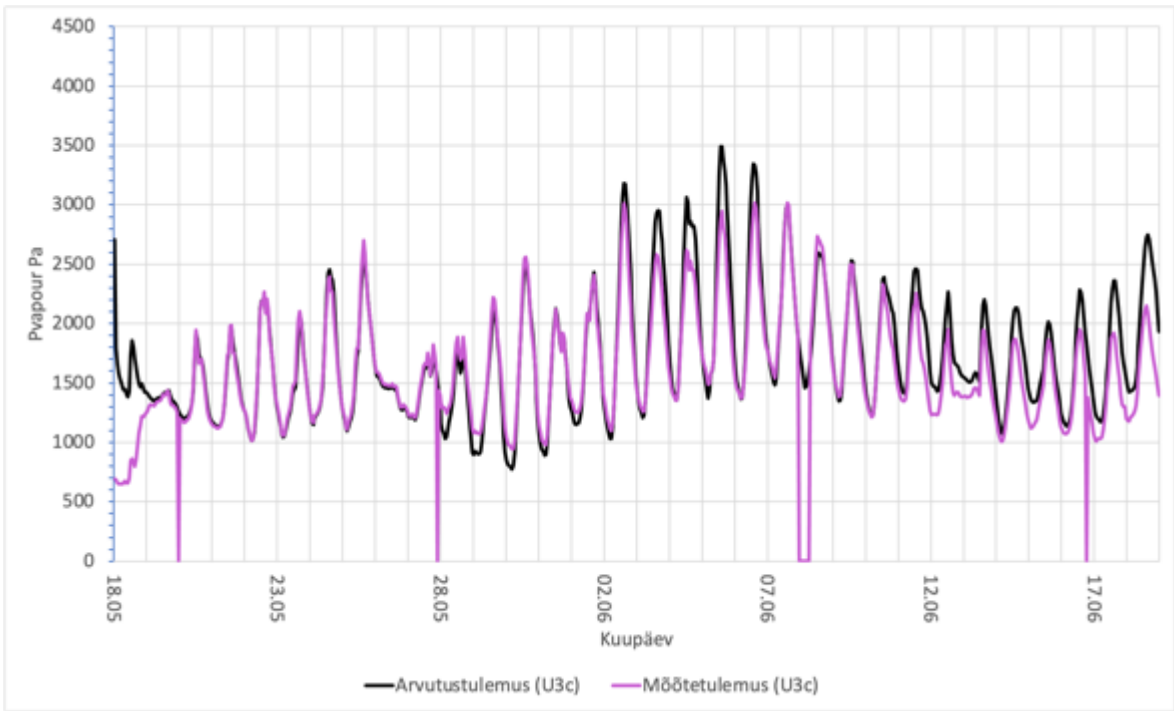
Joonis L2.45 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U2e



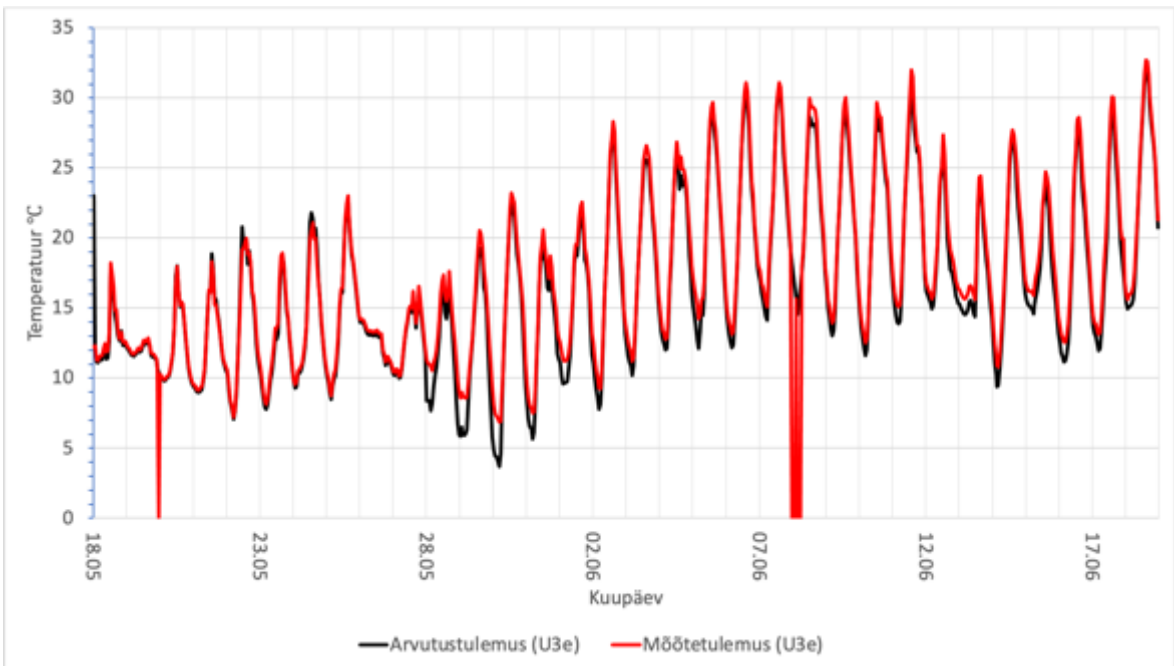
Joonis L2.46 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U3c



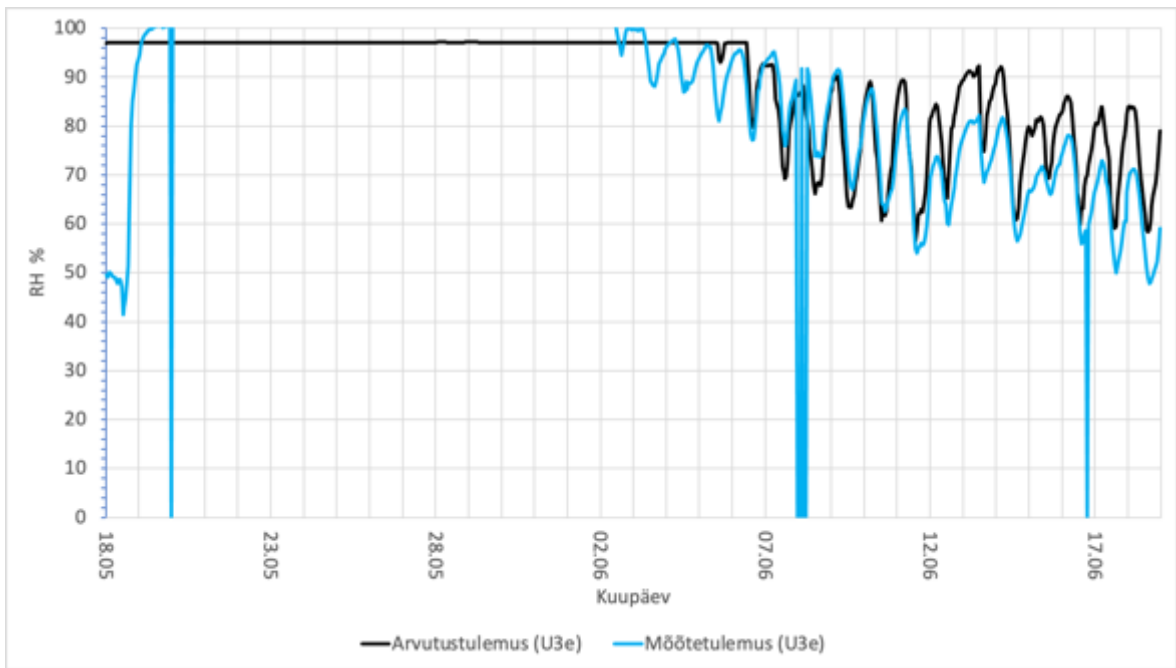
Joonis L2.47 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U3c



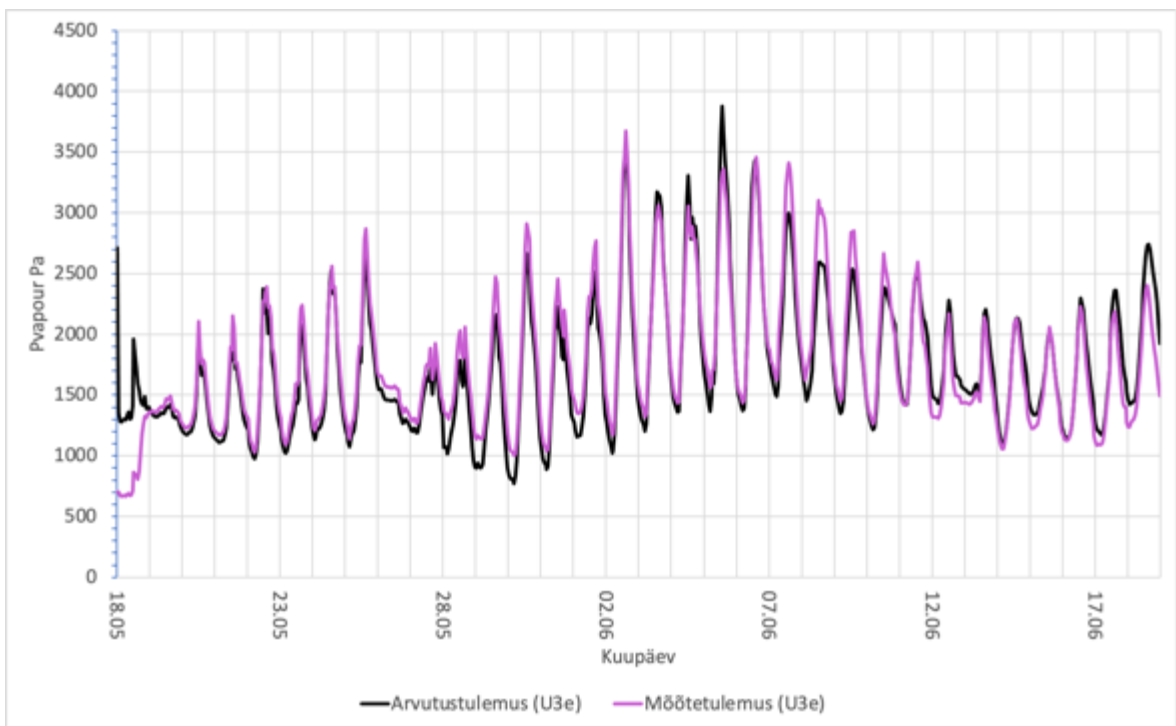
Joonis L2.48 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U3c



Joonis L2.49 mõõdetud ja arvutatud temperatuur punktis U3e



Joonis L2.50 mõõdetud ja arvutatud suhteline niiskus punktis U3e

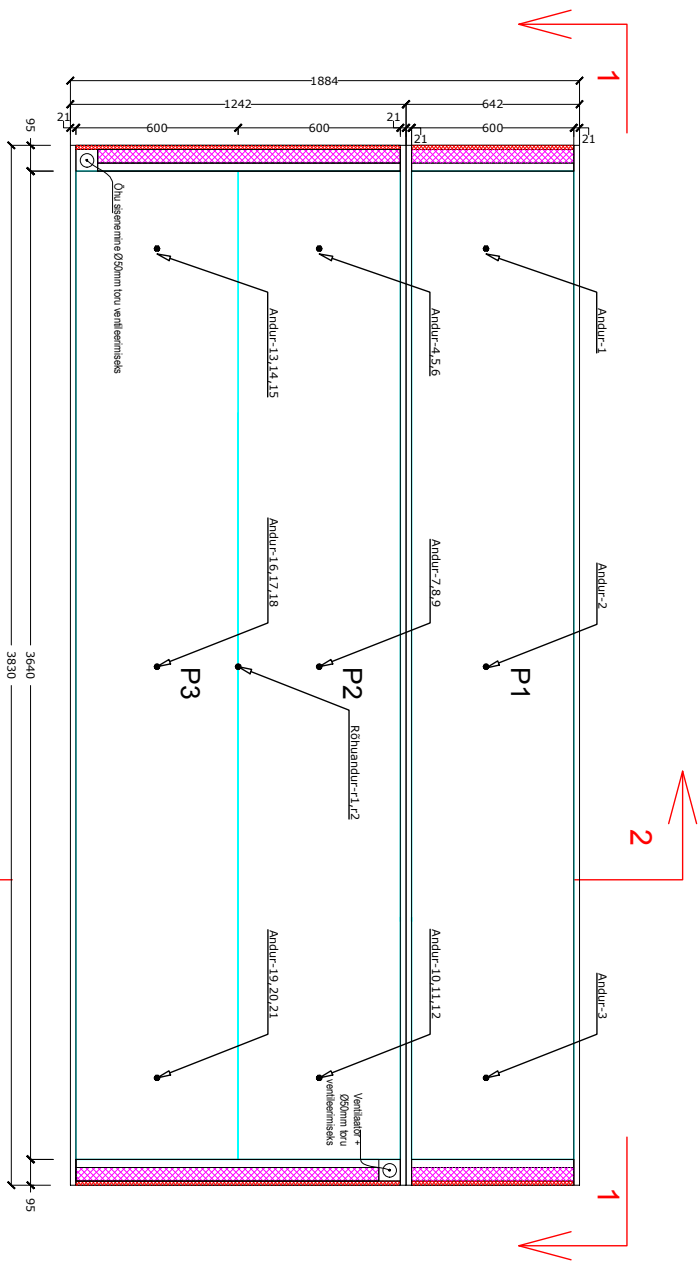


Joonis L2.51 mõõdetud ja arvutatud veeauruosarõhk punktis U3e

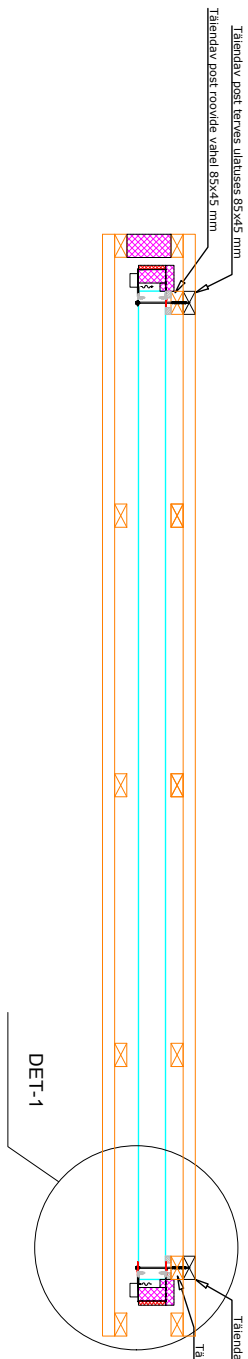
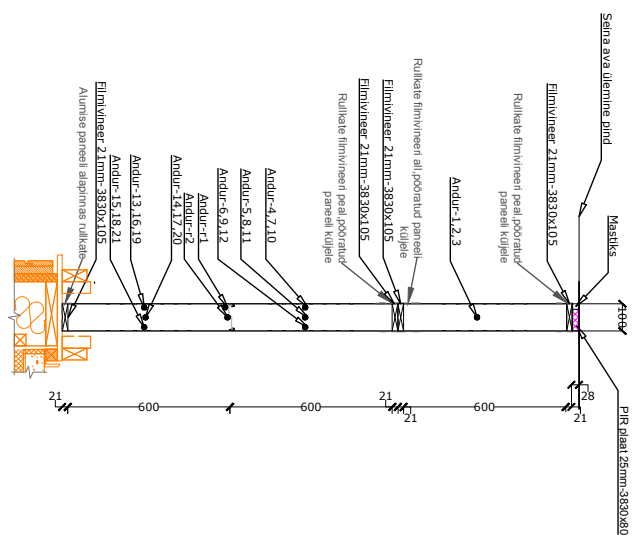
GRAAFILINE OSA

Joonis 1

Graafilise lisa joonis 1 Testseina tööjoonis koos andurite paiknemise ja detailidega



1-1
M1:10



DET-1
M1:10

Diagnostika	Diagnostika	Diagnostika	Diagnostika
Autor	Silm Lomp	Projektant	Andrus Kõiv
Kood	195305_2021-92	Projekt	110
Ühik	Staudim Tööõnne	Projekt	08.04.2021
Ühik	Targo Kalamees	Projekt	17/1
Tähtsaima tehnikakooli		Materjalide 3	
Ehitise projektivõime instituut		1800	
Ehitajate tee 5, Tallinn, 10086			
<p>* Paneel P1 on tagaplaadiga, P1 etaraldatakse ristreel paneelidest õhuvihedat filmivõreer ja bitumine-foolium teibiga P1 väljumis ja alajumis.</p> <p>* Paneelil P2 on alumine tagaplaad, paneelil P3 ülemine tagaplaad.</p> <p>* Paneelidesse paigaldatakse enne tehendamist andurid.</p> <p>* Paneel P3 kaetakse ait filmivõreer ja bitumine-foolium teibiga. Paneel P2 kaetakse ülevaht filmivõreer ja bitumine-foolium teibiga.</p> <p>* Kõikide paneelide külgedele hermeetiliselt tagatakse sõlmuga DET-1 nõnda, et õhk saab liikuda ainult läbi 30 mm õhukanali.</p>			