



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**KIVIVILLAGA SÄNDVITŠ-PANEELIST
KERGSEINTE NIISKUSTEHNILISE TOIMIVUSE
HINDAMINE**

**HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT
SANDWICH PANELS WITH STONE WOOL INSULATION**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Hubert Piikov

Üliõpilaskood 153955 EAEI

Juhendajad: Targo Kalamees, professor
Kristo Kalbe, doktorant-ekspert

Tallinn, 2020.a

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.

"25" mai 2020.a

Autor: Hubert Piikov

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"25" mai 2020.a

Juhendaja: Targo Kalamees

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Hubert Piikov, 153955
Õppekava, peeriala: EAEI, ehitustehnika
Juhendaja(d): professor, Targo Kalamees, 620 2403;
doktorant-ekspert, Kristo Kalbe, 620 2405

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kivivillaga sändvitš-paneelist kergseinte niiskustehnilise toimivuse hindamine

(inglise keeles) Hygrothermal performance of lightweight sandwich panels with stone wool insulation

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Erinevate difusioonitakistusteguritega teipide mõju sändvitšpaneelist ehitusniiskuse väljakuivamisele
2. Sändvitšpaneelide kohta täpse arvutusmodeli koostamine
3. Ühe- ja kahemõõtmelise arvutusmodeli täpsuse hindamine ja võrdlemine kolmemõõtmelise olukorra lahendamiseks
4. Sändvitšpaneeli kivivilla kuivamispotentsiaali hindamine

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katsekehade välikatse ettevalmistamine ja käivitamine	07.11.19
2.	Katsetulemuste analüüs ja andmetöötlus	27.01.20
3.	Arvutusmodelite koostamine ja kalibreerimine	15.03.20
4.	Katse ja arvutustulemuste võrdlus	17.04.20
5.	Testaastaga arvutusmodeli koostamine ja analüüs	11.05.20
6.	Lõputöö vormistamine	25.05.20

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "25" mai 2020.a

Üliõpilane: Hubert Piikov

"25" mai 2020.a

/allkiri/

Juhendaja: professor Targo Kalamees

"25" mai 2020.a

/allkiri/

SISUKORD

Ehituse ja arhitektuuri instituut	3
EESSÕNA	6
MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU	7
Mõisted	7
Tähised	8
1. SISSEJUHATUS	10
1.1 Teraslehtedega kaetud sändvitšpaneelide kirjeldus	10
1.2 Ehitusniiskus	11
1.3 Niiskuslevi	13
1.4 Töö olulisus	16
1.5 Uurimistöö eesmärk.....	17
2. MEETODID.....	18
2.1 Katsemetoodika	18
2.1.1 Katsekehade ehitus ja tööetapid.....	18
2.1.2 Mõõtevahendid	22
2.1.3 Katsekeskkond.....	23
2.2 Arvutusmetoodika	25
2.2.1 Arvutustarkvara	25
2.2.2 Arvutusmudeli kalibreerimine.....	30
2.2.3 Kalibreeritud arvutusmudeliga reaalne olukord.....	34
2.2.4 Reaalse olukorra arvutusmudeli kliima	34
2.2.5 Hindamiskriteeriumid.....	37
3. ARVUTUSTULEMUSED JA NENDE HINDAMINE	38
3.1 Katsetulemused	38
3.2 Ühe- ja kahemõõtmeliste arvutusmudelite võrdlus.....	46
3.3 Arvutustulemuste võrdlus katsetulemustega	47
3.3.1 Katsekeha 1 mõõtetulemuste võrdlus arvutustulemustega.....	48
3.3.2 Katsekeha 2 mõõtetulemuste võrdlus arvutustulemustega.....	52
3.3.3 Katsekeha 3 mõõtetulemuste võrdlus arvutustulemustega.....	55
3.3.4 Katsekehade mõõtetulemuste omavaheline võrdlus	59
3.4 Ehitusniiskuse väljakuivamine reaalsetes kliimatingimustes	61
3.4.1 Sändvitšpaneelis kõige suurema niiskusega koha määramine profiilis61	
3.4.2 Ilmakaarte mõju	63
3.4.3 Erinevate mõõtepunktide asukoha mõju sändvitšpaneelis	65

3.4.4	Algniiskuse mõju	74
4.	ARVUTUSTULEMUSTE ANALÜÜS	78
5.	JÄRELDUSED	80
	KOKKUVÕTE	82
	SUMMARY.....	84
	KASUTATUD KIRJANDUS	86
	LISA 1.....	88

EESSÕNA

Käesoleva magistr töö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli professor Targo Kalamees. Uurimustöö on tehtud koostöös sändvitšpaneeli tootjaga Ruukki Oy. Uurimustöös on keskendunud teraslehtedega kaetud kivivillast soojusisolatsiooni materjaliga sändvitšpaneelidest ehitusniiskuse väljakuivamisele ja niiskustehnilise toimivuse hindamisele.

Lõputöö jaoks vajalikud andmed on kogutud testhoones teostatud katse ja arvutusmodelite koostamise abil. Lõputöö teema on välja pakutud ajal, mil katsekehad olid eelnevalt valmis ehitatud ning katse käivitatud. Katse ehitas ja paigaldas üles doktorant-ekspert Kristo Kalbe. Töös on kirjeldatud katsekehade ehitust, katsetappe ja arvutusmodelite koostamist. Tulemused on esitatud kahes osas: katsetulemuste hindamine ja arvutusmodeli tulemuste võrdlemine ja analüüs.

Uurimustöö valmimisele aitasid kaasa juhendaja professor Targo Kalamees ja kaasjuhendaja doktorant-ekspert Kristo Kalbe.

Võtmesõnad: sändvitšpaneel, ehitusniiskuse välja kuivamine, kivivill, magistr töö.

MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU

Mõisted

Difusioon – erinevate gaaside kontsentratsioonide segunemine, mis moodustab homogeense gaasisegu. Difusiooni teel liigub gaas kõrgemast kontsentratsioonist madalamale ehk. suurema osarõhu poolt madalamale.

Entalpia h , J – termodünaamilise süsteemi siseenergia ja rõhuenergia summa.

Ehitusniiskus – ehitusdetailidesse või -materjalidesse ehitamise käigus või vahetult enne seda sattunud konstruktsiooni või tarindi kasutusaegset tasakaaluniiskust ületav niiskus.

Hügroskoopsus – niiskusimavus ehk imamisvõime, materjali võime imada õhust endasse vett. Hügrokoopsete materjalide niiskussisaldus sõltub ümbritsevast keskkonnast. Ümbritseva keskkonna pikaajalise muutumise puudumisel saavutab materjal tasakaaluniiskuse.

Hüsterees – süsteemi või keha omadus, mis aeglustab süsteemi muutumist või takistab selle ennistumist esialgsesse olekusse. Sel juhul ei sõltu süsteemi väljundsuurus (keha olek) mitte ainult sisendsuurusel, vaid ka selle eelnenud olekust.

Kapillaarne vee liikumine – materjalide poorides vee liikumine seal tekkiva pindpinevuse mõjul ja poorides esineva kapillaarjõu toimele.

Kondensatsioon ehk kondenseerumine – aine üleminek gaasilisest olekust vedelasse olekusse.

Konvektsioon – suurte ainehulkade (gaaside või vedelike) liikumisega kaasneva massi levik.

Niiskuslevi – temperatuuri või rõhu erinevusest põhjustatud niiskuse ülekandumine ühelt kehalt teisele.

Niiskussisaldus – niiskuse hulk materjali kogumassist või kogumahust. Materjali niiskussisaldus sõltub peamiselt ümbritseva keskkonna temperatuurist ja suhtelisest niiskusest.

Soojuserijuhtivus λ , $W/(m \cdot K)$ - materjaliomadus, mis väljendab soojusvoolu vattides, mis läbib ühe meetri paksuse ja ühe ruutmeetrise pinnaga materjalikihti, kui vastastikuste pindade vahel on temperatuuride vahe 1 K.

Soojusisolatsioonimaterjal (soojustus, soojustusmaterjal) – materjalikiht soojuslevi vähendamiseks.

Suhteline difusioonitakistus ehk veeauru difusioonitakistusega võrdne õhukihi paksus s_d , m – seisva õhukihi paksus, millel on sama veeaurutakistus kui kindlal materjalikihil $s_d = \mu \cdot d$

Suhteline niiskus φ või RH, % – õhu tegeliku veeauru osarõhu ja veeauru küllastusrõhu suhe samal temperatuuril $\varphi = \frac{p}{p_{sat}} \cdot 100$

Sändvitšpaneel – tehases eelvalmistatud element, mis koosneb seesmisest isolatsioonimaterjalist kahe jäiga materjali (teraslehed, betoonkihid vm) vahel.

Veeauru difusioonitakistustegur μ_v – väljendab materjali takistuse erinevust võrrelduna sama paksu paigalseisva õhukihiiga samal temperatuuril. Veeauru difusioonitakistustegur leitakse, kui õhu veeaurujuhtivus difusiooni teel, D jagatakse poorse materjali veeauru erijuhtivusega δ_v ; $\mu = \frac{D}{\delta_v}$

Veeauru osarõhk p , Pa – õhus oleva veeauru poolt tekitatav rõhk. Küllastunud õhus kasutatakse tähisel alaindeksit p_{sat}

Tähised

RH – suhteline niiskus, [%]

$D_{v,air}(T)$ – seisva õhu veeaurujuhtivus [m^2/s]

K_g – materjali gaasiläbivus [s]

K_l – veejuhtivus [s]

R_a – universaalne gaasikonstant [$J/(kg \cdot K)$];

R_v – veeauru gaasikonstant [$J/(kg \cdot K)$];

$c_l^{m_w} = 1 - c_l^{m_{voc}}$ on vee kontsentratsiooni vedelikus iseloomustav tegur [kg/kg]

$c_l^{m_{voc}}$ – lenduvate orgaaniliste ühendite kontsentratsiooni vedelikus iseloomustav tegur [kg/kg]

h_v – veeauru entalpia [J/kg]

$h_{voc,g}$ – lenduvate orgaaniliste osakeste entalpia [J/kg]

$j_{conv}^{m_w}$ – vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/($m^2 \cdot s$)]

$j_{conv}^{m_v}$ – veeauru konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/($m^2 \cdot s$)]

$j_{diff}^{m_v}$ – veeauru difuusse liikumise voog [kg/($m^2 \cdot s$)]

$j_{conv}^{m_l} = -K_l \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g \right]$ on konvektiivne voog vedelikus [kg/($m^2 \cdot s$)]

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

$j_{conv}^{m_l}$ – vee konvektiivse liikumise voog [W/m²]

$j_{conv}^{m_g}$ – gaasi konvektiivse liikumise voog [W/m²]

$j_{diff}^{m_v}$ – veeauru difuusse liikumise voog [W/m²]

$j_{diff}^{m_{voc,g}}$ – lenduvate orgaaniliste ühendite difuusse liikumise voog [W/m²]

u_l – vee eri siseenergia [J/kg]

u_g – gaasi eri siseenergia [J/kg]

t – temperatuur, [°C]

λ – soojuserijuhtivus, [W/(m·K)]

$\rho_{REV}^{m_{w+v}}$ on koguniiskuse (vedeliku ja veeauru) tihedus antud ruumalaühikus [kg/m³]

ρ_{REV}^U – siseenergia tihedus [J/m³]

$\sigma_{REV}^{m_{w+v}}$ – niiskuslisa / -kadu antud ruumalaühiku kohta [kg/(m³·s)]

σ_{REV}^U – energia muutumise suurus antud ruumalaühikus [W/m³s]

μ – difusioonitakistustegur [-]

θ_g – gaasi maht ruumalaühikus [m³/m³]

θ_{por} – materjali poorsus [m³/m³]

θ_l – vee maht ruumalaühikus [m³/m³]

1. SISSEJUHATUS

1.1 Teraslehtedega kaetud sändvitšpaneelide kirjeldus

Komposiit- või kergsändvitšpaneel koosneb tavaliselt kahest 1 mm paksusest värvitud teraslehega kattest, mis on liimitud jäiga soojusisolatsioonimaterjalist tuumiku külge. Sändvitšpaneelide laius on tavaliselt 1,2 m, nende pikkus varieerub vahemikus 2,5 m kuni 13 m ja paksus 40 mm kuni 230 mm vahel. (Crewe et al., 2018) Kergpaneelide soojustuseks kasutatakse polümeervahtu, klaasvilla või kivivilla. Paneelid koguvad populaarsust hoonete seinte ja lagede ehitusel, kuna nendega ehitamine on väga kiire ja nad pakuvad ideaalseid soojuslikke ja hermeetilisi omadusi. (Crewe et al., 2018) Sändvitšpaneeli kasutatakse laialdaselt lao-, tööstus- ja ärihoonete ehituses. Aastas paigaldatakse Euroopas ligikaudu 130 miljonit ruutmeetrit (m²) polüuretaanist (PUR-ist) või mineraalvillast soojustusega kergpaneeli. (Weiland et al., 2019)



Joonis 1.1 Sändvitšpaneeli 3D ristlõige (*Wall sandwich...*)

1.2 Ehitusniiskus

Ehitusniiskus on ehitusmaterjali koostises olev või ehitusprotsessi ajal materjali sattuv liigniiskus, mis on põhjustatud sademete sattumisest, veeleketest või liigniiskete materjalide kasutamisest konstruktsioonis. (Othman et al., 2015)

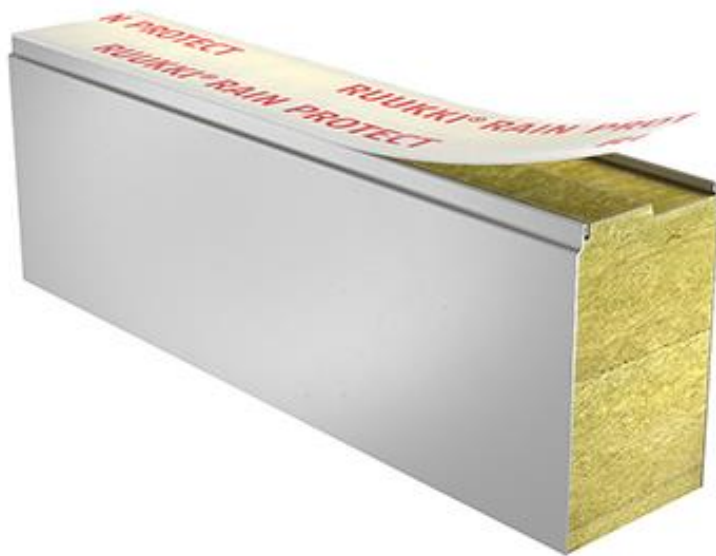
Niiskustehniline toimivus on oluline kriteerium välispiirete toimivuse hindamiseks, kuna hoonete peamised probleemid on põhjustatud niiskuse sattumisest konstruktsiooni. Tarind on niiskustehniliselt toimiv, kui selles on välistatud hallituse teke ja veeauru kondenseerumine. Niiskuse sattumine konstruktsiooni võib põhjustada materjalides mikroorganismide kasvu (terviseprobleemide teke), korrosiooni, lagunemist, omaduste halvenemist, samuti hoonevaldajale suuremaid energia- ja küttekulutusi. (Morishita et al., 2020) Ehituse ajal satub niiskus materjalidesse peamiselt ebapiisava või puuduliku kaitse tõttu ilmastikutingimuste eest. (Othman et al., 2015)



Joonis 1.2 Kivivill soojustusega sändvitšpaneelide ladustamine ehitusobjektil – paneeli otsad avatud, soojustus saab märguda (Kalamees)

Ehitusmaterjalide, seejuures eriti soojusisolatsioonimaterjalide soojuseri juhtivuse väärtused on otseses sõltuvuses soojustuse niiskussisaldusest. Materjali suurema niiskussisalduse korral võib tema soojuseri juhtivuse väärtus olla kordades suurem kuiva materjali omast. Katseliselt on kindlaks tehtud, et veega küllastunud olekus kivivilla soojuseri juhtivus on 0,7...0,9 W/(m·K). Kivivilla soojuslik toime vähenes märkimisväärselt juba madala materjali niiskussisalduse (5...20%) korral, kus kivivilla soojuseri juhtivus oli 0,10...0,14 W/(m·K). Kuiva kivivilla soojuseri juhtivus on tavaliselt 0,037...0,040 W/(m·K). Sellest tulenevalt on oluline jälgida, et liigniiskus ei satuks soojustusse juba ehituse ajal. (Jerman & Černý, 2012)

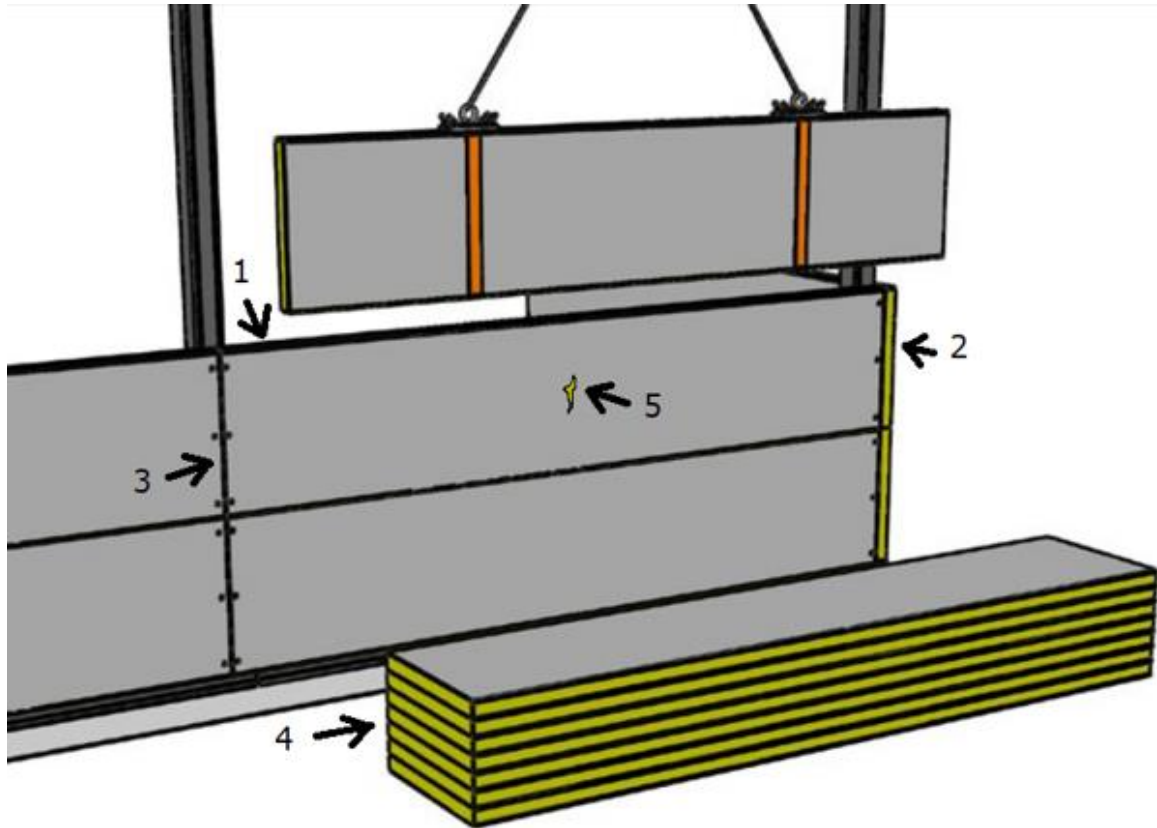
Vältimaks liigniiskuse sattumist sändvitšpaneelide soojustusse on tootjad katnud paneeli soojustuse osa kaitseteibiga (vt joonis 1.3). See kaitseb ehitusprotsessi ajal paneeli vihma eest. Vaatamata kõigile ettevaatusabinõudele võib juhtuda, et ilmastiku tõttu või transpordi käigus on niiskus sattunud materjali sisse. Üksikud tootjad on paigaldusjuhendites välja toonud, et märgunud soojustusega paneelid vähendavad toote kvaliteeti. (Ruukki Oy, 2017)



Joonis 1.3 Sändvitšpaneeli tootja Ruukki Oy lahendus soojustuse märgumise kaitseks (Ruukki Oy, 2017)

Joonisel 1.4 on näidatud niiskuse sattumise erinevaid võimalusi sändvitšpaneeli ehitusobjektidel. Punktides 1, 2 ja 3 näidatud kohtades vett tõkestava teibi puudumise korral võib vesi sattuda paneeli, samuti on soojustus võimeline siduma ümbritsevast kõrge niiskussisaldusega keskkonnast veeauru. Punktis 4 näidatud olukorras on ladustatud sändvitšpaneelid täielikult katmata, soojustus võib vihma korral märguda ning ümbritsevast keskkonnast niiskust siduda. Punktis 5 on näidatud olukorda, kus

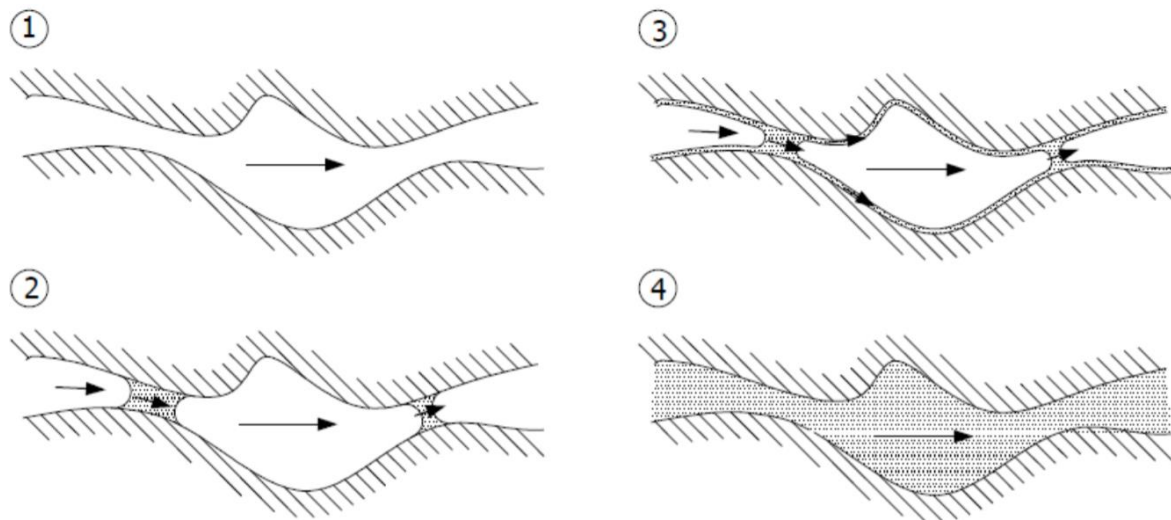
sändvitšpaneeli kahjustuse korral võib vesi pääseda paigaldatud paneeli soojustusse. Samuti võib soojustus ümbritsevast keskkonnast niiskust siduda. Kahjustuse märkamata jätmise korral võib paneeli soojustus suures osas niiskust endasse imada ja niiskuse väljakuivamine võib olla raskendatud.



Joonis 1.4 Niiskuse sattumise võimalused sändvitšpaneeli ehitusobjektil (Ruukki Oy, 2017)

1.3 Niiskuslevi

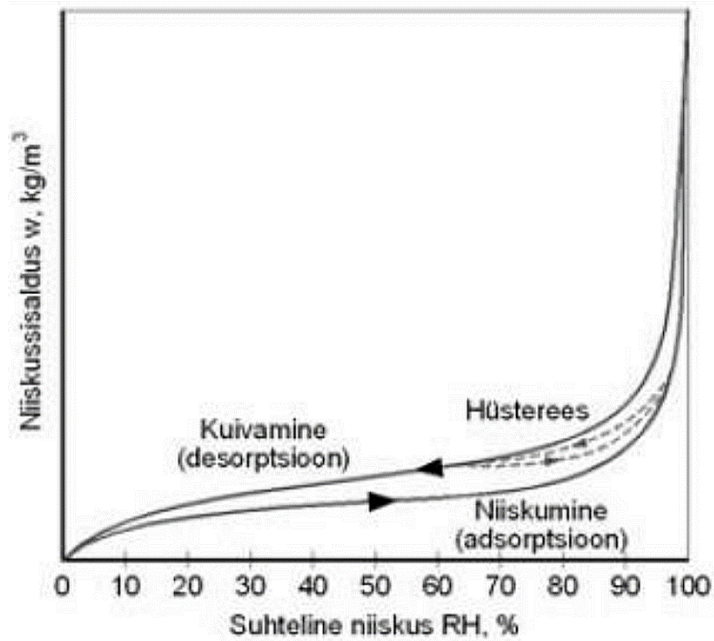
Poorsetes materjalides, nagu näiteks kivivillas, võib niiskus liikuda gaasilises ja vedelas olekus. Niiskuse liikumine võib materjalides toimuda erinevatel viisidel – veeauru osarõhkude erinevuse tõttu, veesurve mõjul, raskusjõu mõjul, pooripindade märgudes, konvektsiooni, pinddifusiooni või difusiooni teel. Samuti võib harva toimuda niiskuslevi ka osmoosi, efusiooni ja termodifusiooni kaudu. Poorsete ehitusmaterjalide kapillaarid on üldiselt väikese läbimõõduga ning hüdrostaatiline surve on väikese mõjuga ning niiskuslevik toimub peamiselt konvektsiooni, difusiooni ja kapillaarimendumise kaudu. (Pihelo, 2015)



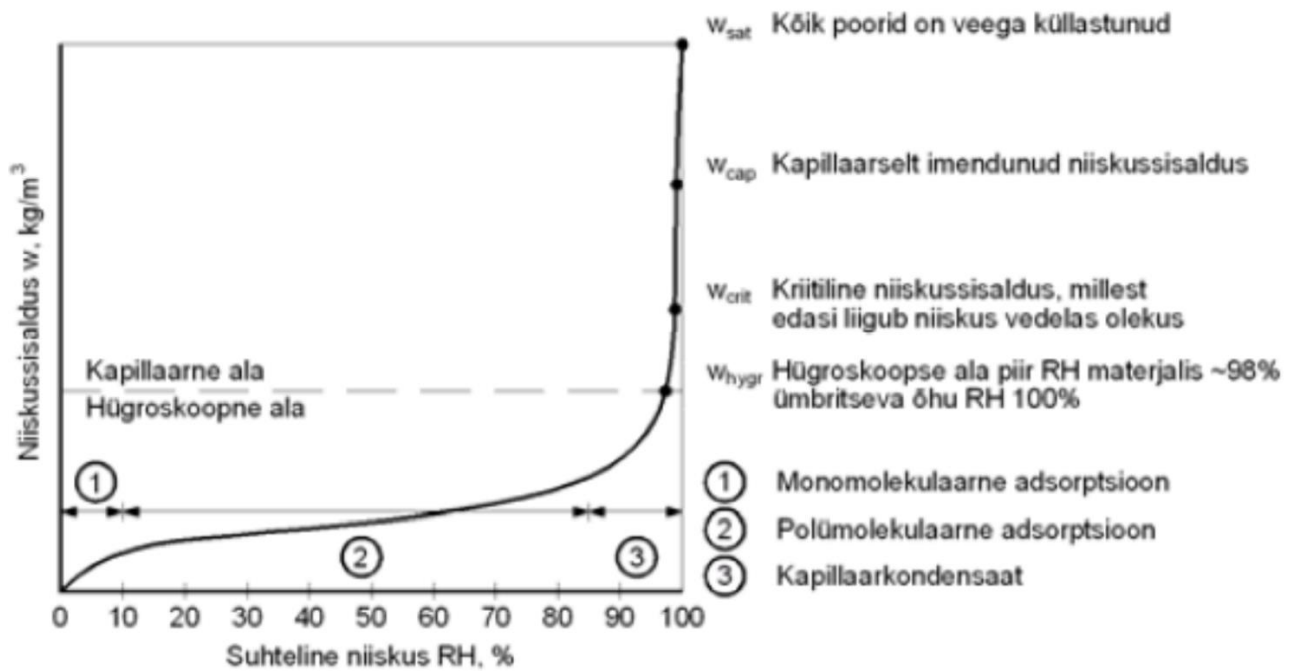
Joonis 1.5 Niiskuse liikumise viisid poorses keskkonnas (Peuhkuri, 2003)

Joonisel 1.5 kirjeldab skeem 1 veeauru difusiooni materjali madala niiskustaseme juures. Skeem 2 iseloomustab veeauru difusiooni koos samaaegse väikese hulga vedeliku liikumisega, kui materjali niiskussisaldus on kõrgem. Skeemil 3 on näidatud üheaegset veeauru difusiooni, vedeliku pinddifusiooni ja vedeliku liikumist materjali kõrge niiskustaseme puhul. Skeemil 4 on materjali poorid täitunud veega, mis liigub kapillaarses alas mõjuvate erinevate jõudude abil. (Pihelo, 2015)

Poorset materjalid suudavad siduda ümbritsevast õhust niiskust (adsorptsioon ehk hügroskoopsus; niiskusimavus) ja niiskusest vabaneda keskkonna niiskuse või temperatuuri alanemise korral (desorptsioon ehk niiskuse kuivamine). Keskkonna (temperatuuri, õhu suhtelise niiskuse) muutused kõigutavad hügrokoopsete materjalide niiskussisaldust. Kui ümbritsevas keskkonnas muutusi pikema aja vältel ei toimu, saavutab materjal tasakaaluniiskuse. Materjali tasakaaluniiskus sõltub eelkõige materjali struktuurist, pooride suurusest ja tihedusest. Materjalide adsorptsiooni, desorptsiooni ja tasakaaluniiskust iseloomustavatelt joonistelt võib näha, et kuivamise ja niiskusimavuse kõvera graafikud ei lange kokku (vt joonis 1.6 ja 1.7). Seda keha omadust nimetatakse hüstereesiks, mis aeglustab süsteemi muutumist või takistab selle ennistumist esialgsesse olekusse. Poorsete materjalide puhul on üldiselt kuivamise faasis tasakaaluniiskuse tase pisut kõrgemal kui niiskusimavuse faasis. See on tingitud materjali poorides paikneva vee vabanemise väiksemast kiirusest võrreldes niiskumisega. (Pihelo, 2015)



Joonis 1.6 Adsorptsiooni, desorptsiooni ja hüsterrees (Pihelo, 2015)



Joonis 1.7 Materjali niiskussisalduse erinevad faasid (Pihelo, 2015)

1.4 Töö olulisus

Varasemalt on uuritud sändvitš-kerpaneelide puhul nende vastuvõtlikkust koormustele ja käitumist tulekahjuolukorras (Crewe et al., 2018) (Daugevičius et al., 2019). Niiskuse liikumist ja selle välja kuivamist on varasemates uurimustes vähe kajastatud. Põhjamaade kliimatingimustes on tõenäoline, et niiskus satub sändvitšpaneelidesse, mistõttu on oluline uurida, kas ja kuidas juba paneeli sattunud niiskus välja kuivab. Soojustusmaterjali kattev terasleht on hermeetiline ning takistab niiskusel välja pääsemast. Mõnedel juhtudel on pikaajaline kõrge niiskussisaldus väliskeskkonna poolse teraslehe sisepinnal põhjustanud teraslehe liimist lahti tulemise soojustuse küljest (vt joonis 1.8). Ainsad kohad, kust niiskus saab tarindist välja kuivada on umbes 30 mm laiused vertikaalsed vuugid, mis jäetakse paneelide paigaldamisel paisumise võimaldamiseks (vt joonis 1.9).



Joonis 1.8 Soojustuse küljest lahti tulnud terasleht hoone välisseina sändvitšpaneelil (Kalamees, erakogu)



Joonis 1.9 Sändvitšpaneeli laahoone välisseinana (Autori erakogu)

1.5 Uurimistöö eesmärk

Käesoleva inseneriõppe lõputöö eesmärkideks on:

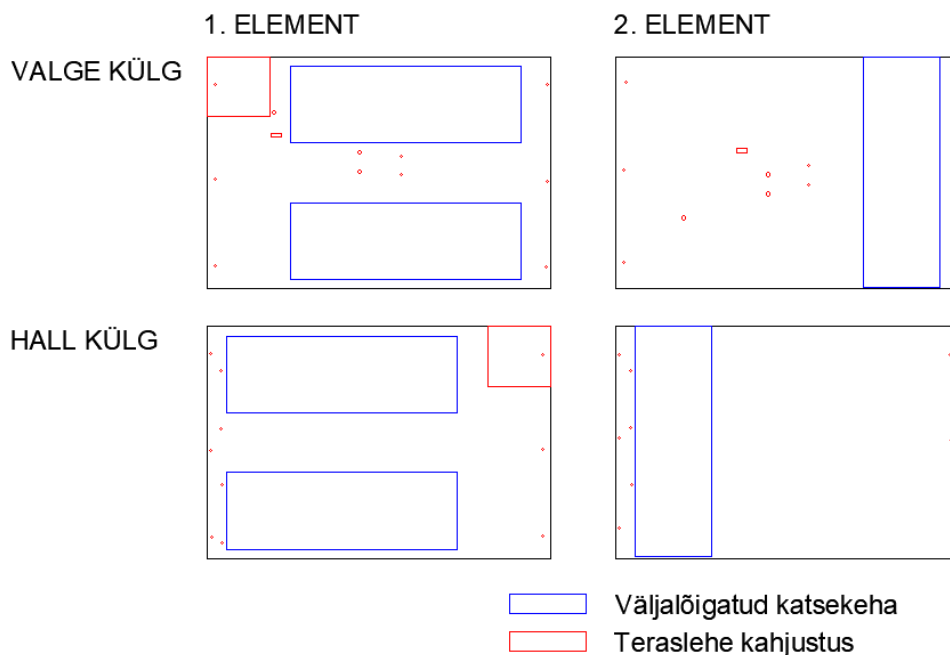
- mõõtetulemuste alusel kalibreerida arvutustarkvaras Delphin 5.9.6 koostatud simulatsioonimudel;
- hinnata ühe- ja kahemõõtmelise arvutusmudeli täpsust kolmemõõtmelise olukorra lahendamiseks;
- analüüsida erinevate suhteliste difusioonitakistustega teipide mõju sändvitšpaneeli ehitusniiskuse väljakuivamisele laborimõõtmise ja modelleerimise abil;
- sändvitšpaneeli kivivilla kuivamispotentsiaali hindamine.

2. MEETODID

2.1 Katsemetoodika

2.1.1 Katsekehade ehitus ja tööetapid

Uurimistöö eesmärgi saavutamiseks tehti laboratoorne katse Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoones ja Mäepealse 3 kinnistul liginullenergia testhoone vahetusse lähedusse püstitatud varikatuse all. Katsekehade valmistamiseks töötati välja katsekehade mõõtmed ja lõikamise asukohad paneelides (vt joonis 2.1). Katsekehad planeeriti vähendatud mõõtmetega, et niiskuse väljakuivamise mõõtmine oleks võimalik (katsekehade kaalumise piisava täpsusega) ning et anduritega saaks suurema osa katsekeha ulatusest mõõdetud. Sändvitšpaneelist katsekeha soojustuse risti- ja pikisuunalise niiskuse väljakuivamise hindamiseks ehitati kokku kolm sarnase ülesehitusega katsekeha. Katsekehade erinevus seisnes sändvitšpaneeli soojustuse kiudude suunast. Kahel katsekehal oli soojustuse kiudude suund vertikaalne imiteerimaks püstipidist paigaldust seinale (katsekehad 1 ja 2) ja ühel katsekehal imiteeris kiudude suund horisontaalset paigaldust (katsekeha 3). Katsekehade paigutus testhoone ruumis ja testhoone vahetusse lähedusse püstitatud varikatuse all on näidatud joonisel 2.2 ja 2.3. Katsekehad markeeriti numbritega üks, kaks ja kolm.



Joonis 2.1 Väljalõigatud katsekehade asukohad sändvitšpaneelidest (Kalbe)



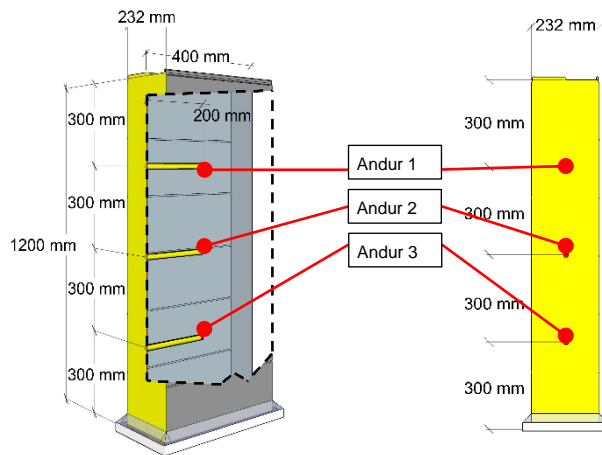
Joonis 2.2 Katsekehad testhoones testruumi põrandal



Joonis 2.3 Katsekehad testhoone vahetusse lähedusse püstitatud varikatuse all

Katseandmete registreerimiseks kasutati temperatuuri ja suhtelise niiskuse andureid HOBO UX100-023a (vt peatükk 2.1.2) katsekehade keskel erinevatel kõrgustel. Andurite paigutus katsekehades on toodud joonisel 2.4. Katsekehade niiskuse

väljakuivamise hindamiseks kaaluti (vt peatükk 2.1.2) katsekehasid kord nädalas või harvem. Pärast igat katselõiku kaaluti katsekehad, saamaks teada nendest välja kuivanud veeauru massi.



Joonis 2.4 3D ja 2D läbilõiked katsekehade sensorite paigutusest (Kalbe et al., 2020)

Uurimistöö raames lõigati kahest sändvitšpaneelist välja kolm katsekeha mõõtmetega 1200x400x232 mm (kõrgus, laius, paksus) (vt joonis 2.1). Paneeli paksus oli 232mm, mis koosnes 230mm paksusest mineraalvilla sisust ja oli mõlemalt poolt kaetud 1mm paksuse tsingiga pinnatud teraslehtedega. Katsekehade külge kinnitati vinkelraudadest (50x50mm) jalad, et hoida neid veetasemest kõrgemal. Vinkelraudad ja kinnituskruvid kaaluti enne kinnitamist. Seejärel hoiustati katsekehasid testhoones temperatuuril vahemikus 23-26 °C ja suhtelise niiskuse vahemikus 30-50% juures 15 päeva, et nendes olev niiskus välja kuivaks ja stabiliseeruks. Seejärel teostati katsekehade kaalumise. Vältimaks katse ajal veeauru külgedelt välja liikumist kaeti katsekehadel keskkonnamõjudele avatud soojustusmaterjal veeaurutiheda alumiiniumfooliumiga, mis on kõrge difusioonitakistusega. Seejärel puuriti 6 millimeetrise diameetriga puuriga 300mm vahedega külgedelt 3 auku, kuhu asetati andurid. Andurid asetati 200mm sügavusel soojustuskihi keskele. Küljelt välja tuleva andurijuhtme ümbrus isoleeriti tihedalt veeaurutiheda fooliumteibiga. Katsekehad asetati seejärel 1500 grammi veega täidetud plekist anumasse sedasi, et veepinna ja katsekeha vahe oleks umbes 10 millimeetrit. Plekist anuma ja sändvitšpaneeli üleminek kaeti samuti veeauru tiheda fooliumteibiga, mis takistas ühendusest veeauru välja liikumist. Katsekeha 1 kaeti esialgu pealt täielikult veeaurutiheda fooliumteibiga, et uurida veeauru stabiliseerumise ja küllastumise kiirust mineraalvillas. Katsekehade 2 ja 3 pealmised

pinnad jäeti esialgu täielikult avatuks, et uurida niiskuse välja kuivamise kiirust, veeauru läbilaskevõimet mineraalvillas ja mineraalvilla kiudude suuna mõju veeauru difusioonile. Läbiviidud katse tööetapid ja kirjeldused on toodud tabelis 2.1. Pärast iga etapi lõppu kaaluti katsekehad ja vahetati teipi või muudeti katsekeha pealmise pinna avatust. Seda eesmärgiga testida erinevate suurustega avade ja teipide veeauru läbilaskvust ning katsekehadest veeauru väljakuivamist erinevates olukordades.

Tabel 2.1 Läbiviidud katse tööetappi kirjeldused ja kestused (Kalbe et al., 2020)

Katse nr.	Kirjeldus	Aeg, päevades	t_i , °C (katseruum)	RH_i , % (katseruum)	Kommentaariid
1	<i>Sandwich</i> -paneelid hoiustati testhoonesse Katsekehade ettevalmistused. Niiskuse väljakuivamine katsekehadest.	35 15	23 - 26 23 - 26	30 - 50 30 - 50	- -
2	Veeanumate kinnitamine katsekehade alla. Veeauru stabiliseerumise ja küllastumise kiiruse uurimine katsekehas 1 (KK1). Veeauru väljakuivamise kiiruse ja veeauru läbilaskevõime uurimine katsekehadest 2 ja 3 (KK2 ja KK3).	26 KK1 ja KK3 32 KK 2	22 - 24	31 - 34	KK1: Pealt täielikult kaetud KK2: Pealt täielikult avatud KK3: Pealt täielikult avatud
3	Vesi on veeanumas katsekehade all. Veeaurutihe bituumenlint paigaldati katsekehade peale - jäeti 30mm x 375mm ava, et katsetada veeauru väljakuivamist erinevates olukordades. Veeauru väljakuivamise mõõtmine läbi ava erinevate teipidega kattes.	16 KK1 ja KK3 21 KK2	22 - 24	31 - 34	KK1: Ava teibitud $S_d = 0.05$ m KK2: Ava teibitud $S_d = 15$ m KK3: Ava teibitud $S_d = 15$ m
4	Vesi on veeanumas katsekehade all. Mõningad teibid eemaldati. Veeauru väljakuivamise mõõtmine katsekehas 1 ja 3 (KK1 ja KK3) läbi 30 mm x 375mm avade, ilma teipideta olukorras.	11 KK1 ja KK3 0 KK2	22 - 24	31 - 34	KK1: Ava täielikult avatud. KK2: Ava teibitud $S_d = 15$ m KK3: Ava täielikult avatud.
5	Vesi on veeanumas katsekehade all. Kõik teibid eemaldati. Veeauru väljakuivamise mõõtmine kõikides katsekehadest läbi 30mm x 375mm avade, ilma teipideta olukorras ja kõrgema temperatuuriga.	17	31 - 35	25	KK1: Ava täielikult avatud. KK 2: Ava täielikult avatud. KK3: Ava täielikult avatud.
6	Vesi on veeanumas katsekehade all. Pealmised avad ilma teipideta. Katsekehad paigudati õue varikatuse alla. Erinevate temperatuuride mõjude uurimine ja veeauru väljakuivamise mõõtmi	14	0 - 10		KK1: Ava täielikult avatud. KK2: Ava täielikult avatud. KK3: Ava täielikult avatud. Suhteline niiskus õues läheneb küllastustasemini.

Katselised veeauru osarõhud katsekehades arvutati andurite poolt registreeritud temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõteandmete põhjal. Veeauru osarõhkude leidmiseks arvutati esmalt veeauru küllastusrõhk vastavalt temperatuurile valemitega 4.1 ja 4.2. Veeauru osarõhk avaldatakse suhtelise niiskuse arvutusvalemist (valem 4.3). (EVS-EN ISO 13788:2012)

$$p_{sat} = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot T}{237.3 + T}}, \text{ kui } T \geq 0^\circ\text{C}, \text{ Pa}$$

(4.1)

$$p_{sat} = 610.5 \cdot e^{\frac{21.875 \cdot T}{265.5 + T}}, \text{ kui } T \leq 0^\circ\text{C}, \text{ Pa}$$

(4.2)

Kus:

T – temperatuur, °C.

$$RH = \frac{p}{p_{sat}} \cdot 100\%$$

(4.3) Kus:

RH – suhteline niiskus, %;

p – veeauru osarõhk niiskes õhus, Pa;

p_{sat} – veeauru osarõhk veeaurudega küllastunud õhus samal temperatuuril, Pa.

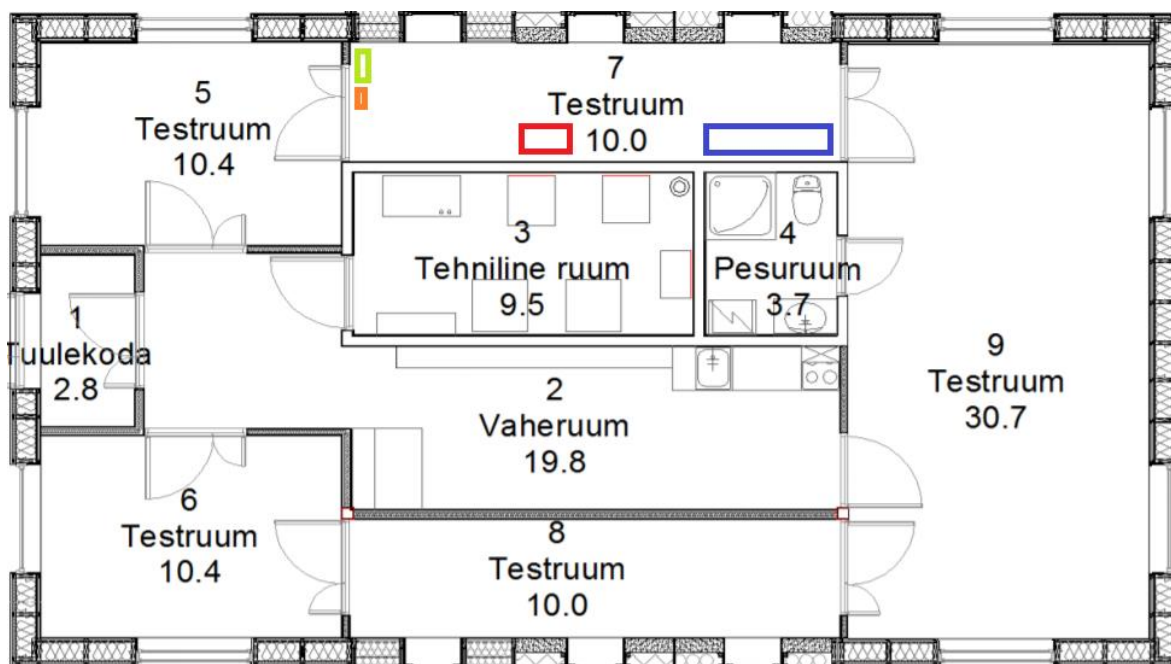
2.1.2 Mõõtevahendid

Katseandmete salvestamiseks on kasutatud mõõteandureid, mis on asetatud katsekehade sisse puuritud avadesse. Temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmiseks on kasutatud ühte tüüpi temperatuuri-suhtelise niiskuse andmelogerit HOB0 UX100-023a ($\varnothing = 6,0$ mm; mõõtetäpsus $T = \pm 0,21^\circ\text{C}$ temperatuurivahemikus -0° kuni 50°C , mõõtevahemik $RH = 1\% - 100\%$ temperatuurivahemikus -40°C kuni 75°C , mõõtetäpsus $RH = \pm 2,5 \dots 3,5\%$ suhtelise niiskuse vahemikus 10% kuni 90% , mõõtetäpsus $RH = \pm 5\%$ suhtelise niiskuse vahemikus all 10% ja üle 90% puhul). Andurite paiknemise skeem katsekehades on näidatud joonisel 2.4.

Katsekehade kaalumiseks on kasutatud täppiskaalu KERN DS 30K0.1L (mõõtetäpsus $m = \pm 0,2\text{g}$, mõõtevahemik $m = 1 \dots 30000\text{g}$, töötemperatuur $10 \dots 40^\circ\text{C}$, töötamise maksimaalne suhtelise niiskuse tase 80%).

2.1.3 Katsekeskkond

Katsekehad paigaldati Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse 3 liginullenergia testhoone testruumi (vt joonis 2.5). Testruumis oli tavaolekus sisetemperatuur 23 °C. Töötapis, kus niiskuse väljakuivamist uuriti kõrgema temperatuuriga, köeti ruumi radiaatorküttega, mis oli võimalik hoida soovitud temperatuuri. Elektriradiaator paigaldati testruumis katsekehadest eemale, et ei toimuks katsekeha teraslehe otsest kuumutamist ja mõne katsekeha eelistatumat kuivatamist. Sooja õhu levimiseks paigaldati testruumi õhuventilaator ning suhtelise niiskuse taseme hoidmiseks paigaldati ruumi õhukuivati. Õhukuivati oli võimalik seadistada olekusse, kus ta hoidis seadistatud suhtelise niiskuse taset. Ruumis suhtelise niiskuse taseme tõustes, käivitus seade ja kuivatas ruumi õhku, kogudes testruumis oleva veeauru anumasse. Õhukuivatist tulev kondensaadivesi suunati kinnisesse anumasse, mis oli veeaurutihedalt kinni, et õhust kinni püütav veeaur uuesti õhku ei aurustuks.



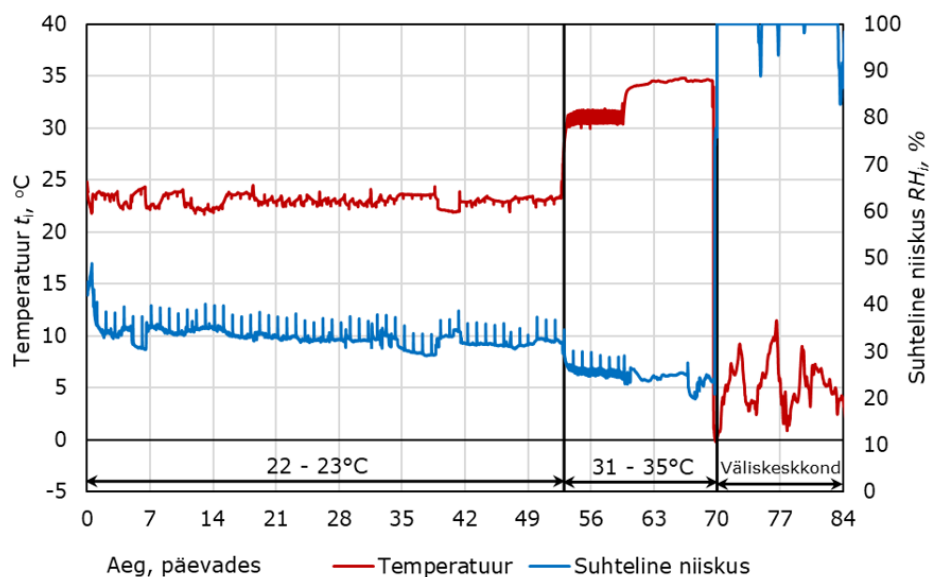
Joonis 2.5 Testhoone plaan; sinisega markeeritud katsekehade asukoht, punasega õhukuivati, rohelisega elektriradiaator ja oranžiga õhuventilaator (Kalamees)

Väliskeskonna katsetapi jaoks ehitati ajutine varjualune (vt joonis 2.6), mis kaeti kilepresendiga nii pealt kui ka külgedelt, et otsene ja kaldvihm ei mõjutaks katse kulgu. Ajutise varjualuse mõõtmed olid 1,2m x 2m x 1,8...2m (sügavus, laius, kõrgus).



Joonis 2.6 Väliskeskonna katse jaoks ehitatud ajutine varjualune

Katse kogukestuseks oli 84 päeva, mis viidi läbi ajavahemikus 30.08.2019 – 22.11.2019. Sellest 70 päeva jooksul viidi läbi 4 erinevat töötappi testhoones ja 14 päeva jooksul väliskeskonna katse, mil katsekehad olid asetatud väliskeskonda. Katse ajal mõõdetud ääretingimused (temperatuur ja suhteline niiskus) on toodud alloleval joonisel 2.7.



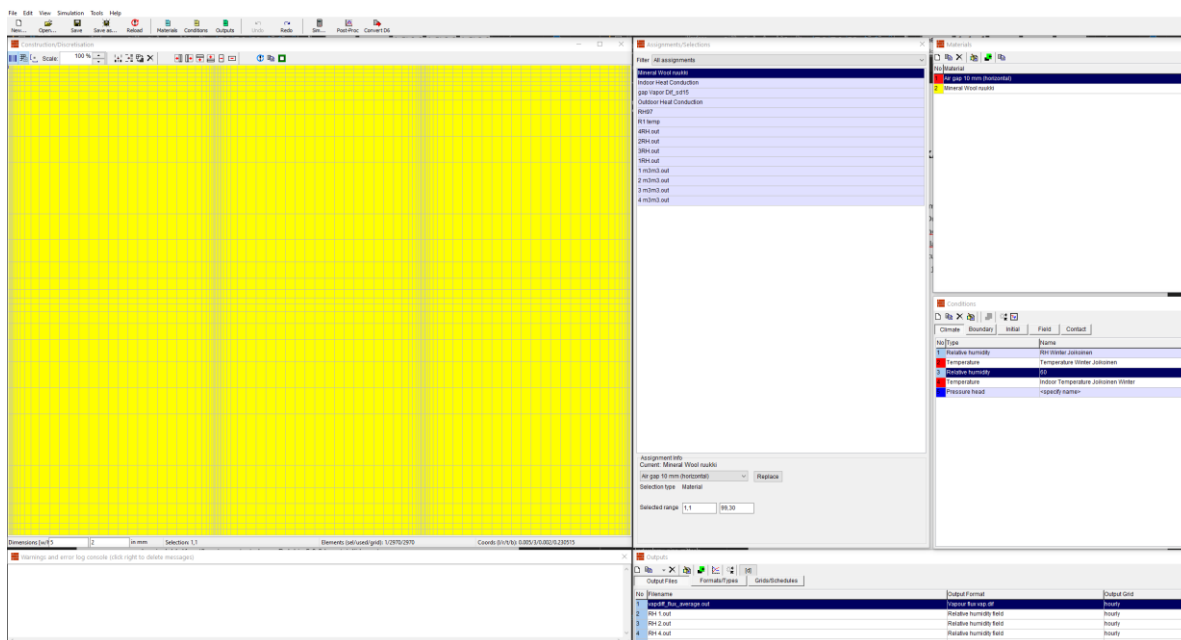
Joonis 2.7 Temperatuur ja suhtelise õhuniiskus graafik katsekehade ümber

2.2 Arvutusmetoodika

2.2.1 Arvutustarkvara

Katsekehade arvutusmodelite koostamiseks ja arvutamiseks on kasutatud Delphin 5.9.6 tarkvara, mille on välja arendanud Dresdeni Tehnikaülikooli ehitusklimatoloogia instituudi teadlased Andreas Nicolai, John Grunewald ja Heiko Fechner. Delphin on matemaatilistel algoritmidel põhinev dünaamiline simulatsiooniprogramm, millega saab määrata soojuse, õhu, niiskuse ja osakeste liikumist ehitusmaterjalides. Allpool on toodud ka Delphin 5 töölauda iseloomustav joonis (vt joonis 2.8). Delphin tarkvara kasutatakse erinevate ehitusfüüsika ülesannete lahendamiseks ja olukordade hindamiseks (Grunewald & Nicolai, 2015):

- niiskuse väljakuivamise probleemide lahendamine;
- sisemiste soojussüsteemide kavandamine ja toimivuse hindamine;
- külmasildade arvutuste lahendamine, niiskustehniliste probleemide hindamine;
- tarindite hallitusriskide tekkimise hindamine;
- ventileeritud fassaadi- ja katusesüsteemide hindamine;
- aastase küttevajaduse arvutamine.



Joonis 2.8 Kuvatõmmis tarkvara Delphin 5.9.6 töölaust

Tarkvara abil saab arvutada nii ühe- kui ka kahemõõtmelisi tarindeid, kus simulatsiooni käivitamiseks tuleb määrata järgmised algandmed:

- konstruktsiooni geomeetria;
- materjalid, nende omadused ja asukoht konstruktsioonis;
- algingimused konstruktsiooni materjalide kihtides, sise- ja välispindadel;
- ääritingimused;
- nõutavad väljundid;
- simulatsiooni modelleerimise parameetrid;
- simulatsiooni modelleerimise arvutustäpsus.

Tarkvara Delphin 5.9.6 töötamise aluseks on füüsikaline mudel CHAMPS, mis on lühend sõnadest „*coupled heat, air, moisture, pollutant simulation*” ja „*heat, air, moisture, pollutants and salt transport*”, mis tähendab tõlgituna kombineeritud soojuse, õhu, niiskuse ja saasteainete simulatsiooni. CHAMPS füüsikaline mudel koosneb mitmetest osatuletistega võrranditest, mille lahendamiseks kasutatakse lõplike elementide meetodit. Tarkvara jagab kasutaja poolt sisestatud konstruktsiooni geomeetria ühemõõtmelistes arvutustes kas ühesuguse või muutuva laiusga materjalikihtideks ning kahemõõtmelistes arvutustes kas ekvivalentse või muutuva pindalaga materjalitükkideks. Kasutaja saab defineerida elementide koguarvu, mille alusel jagab tarkvara konstruktsiooni osadeks. Integreerimisel üle ruumala on võrrandid jagatud harilikeks diferentsiaalvõrranditeks, milles kõik tundmatud on ajast sõltuvad. Diferentsiaalvõrrandid lahendatakse arvmeetodeid kasutava lahendaja (ingl. Solver) abil. (Grunewald & Nicolai, 2015)

Tarkvara Delphin 5 on mitmeid kordi valideeritud nii programmi loojate, teiste teadlaste kui ka institutsioonide poolt erinevate teadusprojektide raames. Viimane tarkvara autorite poolne valideerimine toimus 2013. aastal, mil tarkvaraga sooritati edukalt HAMSTAD arvutuskriteeriumid 1 kuni 5, mis kirjeldavad soojus-, niiskus- ning õhuvoogude liikumist ehitismaterjalides, tarindite või ehitiste osade soojus- ja niiskustehnilist toimivust kirjeldavale standardile EN 15026:2007 kohase vastavuse kontroll. (Sontag et al., 2013)

Delphin 5.9.6 tarkvara kasutab ülesannete lahendamiseks järgnevaid tasakaaluvõrrandeid:

Niiskustasakaal:

Tasakaaluvõrrandi lihtsustuseks ja eelduseks arvestatakse, et: (Grunewald & Nicolai, 2015)

- kehtib Kelvini võrrand poorirõhu ja suhtelise niiskuse kohta;
- vee difusioon ja faaside vaheline rõhuerinevus on tühiselt väikesed, mispärast neid arvesse ei võeta;
- kõikide faaside vahel esineb rõhkude tasakaal;
- tahkete materjalide deformatsioonid on tühiselt väikesed, mispärast neid arvesse ei võeta;
- jääd ei teki.

Arvestades eeltoodud lihtsustustega, avaldub niiskuse massi tasakaaluvõrrand järgmisel kujul (valem 4.4) :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_w+v} = \frac{\partial}{\partial x} [j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}] + \sigma_{REV}^{m_w+v} \quad (4.4)$$

Kus:

$\rho_{REV}^{m_w+v}$ on koguniiskuse (vedeliku ja veeauru) tihedus antud ruumalaühikus [kg/m³];

$j_{conv}^{m_w}$ on vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m²·s)];

$j_{conv}^{m_v}$ on veeauru konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m²·s)];

$j_{diff}^{m_v}$ on veeauru difuusse liikumise voog [kg/(m²·s)];

$\sigma_{REV}^{m_w+v}$ on niiskuslisa/ -kadu antud ruumalaühiku kohta [kg/(m³·s)].

Veeauru konvektiivne liikumise voog

$$j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} \cdot j_{conv}^{m_g} \quad (4.8)$$

Kus:

$j_{conv}^{m_g}$ – konvektiivne gaasivoog [kg/m²s];

$$c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a+p_v} \cdot \frac{R_a}{R_v} - \text{veeauru massi kontsentratsioon gaasis [kg/kg];} \quad (4.9)$$

Kus:

p_v – veeauru osarõhk [Pa];

p_a – õhurõhk [Pa];

R_a – universaalne gaasikonstant [J/(kg·K)];

R_v – veeauru gaasikonstant [J/(kg·K)];

Difusiooni teel liikuv veeaur

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

(4.10)

Kus:

$D_{v,air}(T)$ – seisva õhu veeaurujuhtivus [m²/s];

μ – difusioonitakistustegur [-];

$f(\theta_g)$ – funktsioon gaasi mahust ruumalaühiku kohta [-];

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l$$

(4.11) Kus:

θ_g – gaasi maht ruumalaühikus [m³/m³];

θ_{por} – materjali poorsus [m³/m³];

θ_l – vee maht ruumalaühikus [m³/m³].

Õhumassi tasakaal:

Tasakaaluvõrrandi lihtsustuseks ja eelduseks arvestatakse, et: (Grunewald & Nicolai, 2015)

- kuiv õhk koosneb O₂, N₂ ning teistest vähemtähtsatest osakekest, välja arvatud VOC (*volatile organic compounds* e. lenduvad orgaanilised ühendid) ja veeaur;
- gaasifaas sisaldab kuiva õhku, veeauru ja VOC;
- gaasifaasi konvektiivset voogu vaadeldakse eraldi soojuse, niiskuse ja saasteosakeste liikumisest ehk soojuse, niiskuse ja saasteosakeste liikumisel ei ole õhuvoolule muud mõju peale üleslükkejõu;
- arvestatakse ainult laminaarse gaasivooluga;
- liikumise kineetiline energia on tühiselt väike, mispärast seda ei võeta arvesse;
- kuiva õhu gaasikonstant on kasutatav ka niiske õhu korral.

Õhumassi tasakaalu esitatakse valemiga ...

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_a} = \frac{\partial}{\partial x} [j_{conv}^{m_a}] + \sigma_{REV}^{m_a}$$

(4.12)

Kus:

$\rho_{REV}^{m_a}$ – õhu massi tihedus referentsruumala kohta [kg/m³];

$j_{conv}^{m_a}$ – konvektiivse õhu massi voog [kg/m²s];

$\sigma_{REV}^{m_a}$ – õhu allikad/lekked referentsruumala kohta [kg/m³s].

Õhumassi konvektiivse liikumise voog

$$j_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} j_{conv}^{m_g}$$

(4.13)

Kus:

$$c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_v}{R_a} \quad \text{on õhu massi kontsentratsioon gaasis [kg/kg];}$$

(4.14)

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g \left[\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g g \right] \quad \text{on gaasi konvektiivne voog [kg/m²s];}$$

(4.15)

K_g – materjali gaasiläbivus [s]

$p_g = p_a + p_v$ on gaasirõhk [Pa]

$$(4.16) \quad \rho_g = \frac{\rho_g}{R_a T} \quad \text{on gaasi tegelik tihedus [kg/kg]}$$

(4.17)

Sisemise energia tasakaal

Tasakaaluvõrrandi lihtsustuseks ja eelduseks arvestatakse, et: (Grunewald & Nicolai, 2015)

- temperatuuride tasakaal esineb kõikide faaside vahel;
- sisemise energia ja entalpia vaheline erinevus on tühiselt väikse, mispärast sellega ei arvestata.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{diff}^Q + u_l j_{conv}^{m_l} + u_g j_{conv}^{m_g} + h_v j_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} j_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^U$$

(4.18)

Kus:

ρ_{REV}^U – siseenergia tihedus [J/m³];

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

u_l – vee erisiseenergia [J/kg];

$j_{conv}^{m_l}$ – vee konvektiivse liikumise voog [W/m²];

$$\begin{aligned}
& u_g - \text{gaasi erisiseenergia [J/kg];} \\
& j_{conv}^{m_g} - \text{gaasi konvektiivse liikumise voog [W/m}^2\text{];} \\
& h_v - \text{veeauuru entalpia [J/kg];} \\
& j_{diff}^{m_v} - \text{veeauuru difuusse liikumise voog [W/m}^2\text{];} \\
& h_{voc,g} - \text{lenduvate orgaaniliste osakeste entalpia [J/kg];} \\
& j_{diff}^{m_{voc,g}} - \text{lenduvate orgaaniliste ühendite difuusse liikumise voog [W/m}^2\text{];} \\
& \sigma_{REV}^U - \text{energia muutumise suurus antud ruumalaühikus [W/m}^3\text{s].} \\
& j_{diff}^Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}
\end{aligned}$$

(4.19)

Kus:

λ – materjali soojuserijuhtivus [W/(m·K)];

T – temperatuur [K].

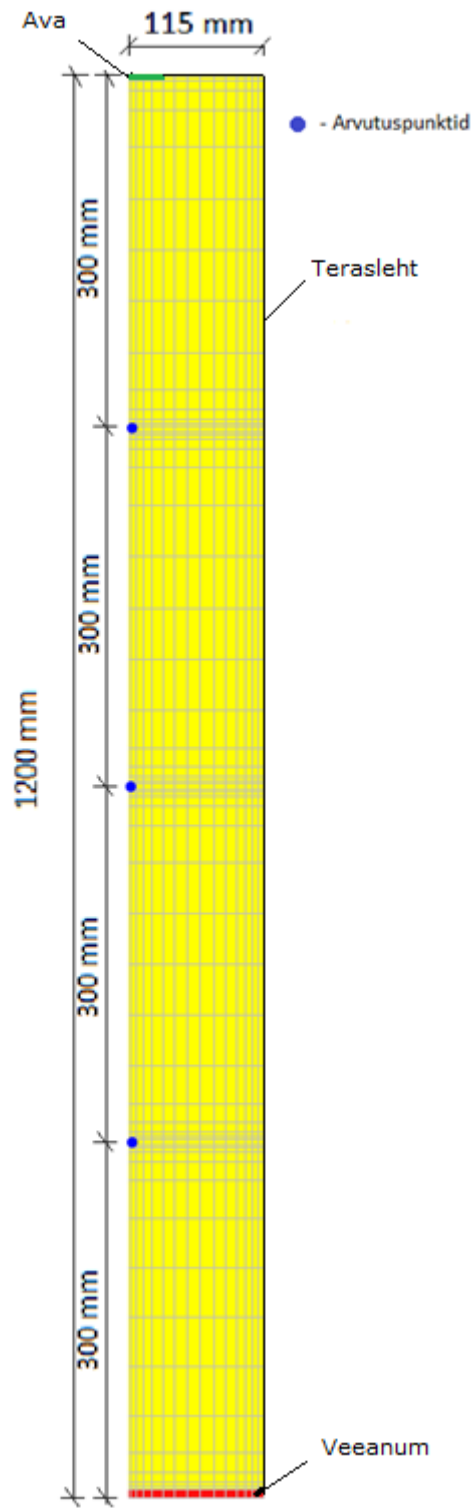
2.2.2 Arvutusmodeli kalibreerimine

Arvutusmodel kalibreeriti eesmärgiga luua katsetulemustele võimalikult sarnane arvutusmodel, mis on piisavalt täpne ja usaldusväärne. Kalibreeritud arvutusmodeliga teostati arvutused sändvitšpaneeli niiskuse väljakuivamise kiiruse leidmiseks. Arvutusmodeli ääritingimused määrati katse käigus katsekeskkonna anduri poolt, mis registreeris suhtelise niiskuse ja temperatuuri väärtused katsekehade ümber. Katseetapis, kus katsekehad olid paigutatud väliskeskkonda, registreeris ääritingimusi katsekehade kohale paigaldatud andur, õigsuse kontrolliks võrreldi neid ka testhoone väliskliima anduri tulemustega. Korrekse arvutusmodeli saamiseks viidi Delphin 5.9.6 tarkvara andmebaasis oleva mineraalvilla esialgsed soojuserijuhtivuse, mahumassi ning sorptsiooni graafiku väärtused vastavusse katses kasutatud materjalide deklareeritud väärtustega, saavutamaks arvutustulemused, mis sarnaneksid võimalikult palju katsetulemustega. Arvutusmodeli täpsust hinnati nelja erineva näitaja (temperatuur, veeauru osarõhk, suhteline niiskus ja niiskuse väljakuivamise kiirus) alusel koostatud graafikute võrdlemisel katsetulemuste graafikutega. Peamine eesmärk oli teostada võimalikult täpne arvutusmodel, mis on vastavuses katsetulemustega ning jääb mõõtmistäpsuse piiridesse. Ühtlasi oli tähtis arvutusmodelis teipide tõestatud omadusi minimaalselt muuta. Arvutusmodeli arvutusvõrk koos punktidega on toodud joonisel 2.9.

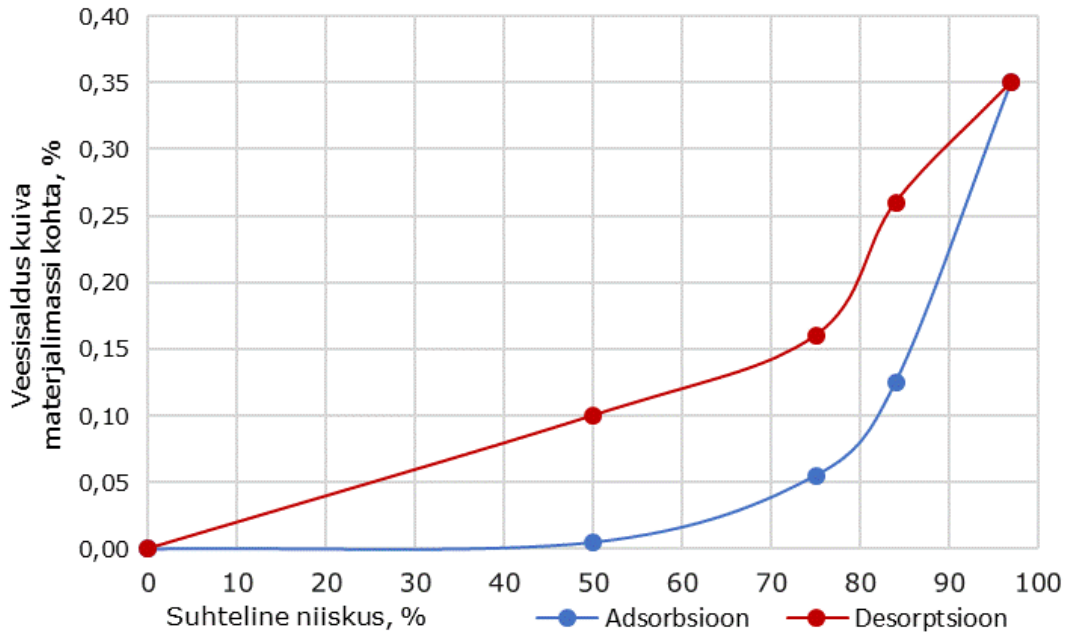
Arvutusmudeli valideerimiseks on kasutatud Delphin 5.9.6 tarkvara andmebaasis olevat mineraalvilla, mille esialgsed ja redigeeritud näitajad on toodud allolevas tabelis 2.2. Mudelite valideerimise käigus on redigeeritud mineraalvilla soojuserijuhtivuse (λ) väärtust, mahumassi ja sorptsiooni isotermi graafiku väärtuseid – see tähendab, et need ei ole samad, mis andmebaasis olevatel materjalidel. Katsekehade isolatsioonimaterjali sorptsiooni isotermi graafik koostati kivivilla tootja poolt antud spetsifikatsiooni alusel (vt joonis 2.10). Teipide mõju kajastamiseks arvutusmudelis muudeti keskkonna ääretingimusi modelleeritud ava juures ning redigeeriti suhtelise difusioonitakistuse väärtust (edaspidi S_d -väärtus) nii, et see imiteeriks teibi mõju. Veeauru läbilaskva teibi puhul võeti S_d -väärtuseks 0,05 m ja veeauru mitteläbilaskva teibi puhul S_d -väärtuseks 15m. Teraslehele veeauru difusiooni ekvivalentset õhukihi paksuse väärtust ei omistatud. Teraslehtede puhul arvestati, et tegu on veeauru absoluutselt mitteläbilaskva materjaliga (S_d -väärtus = ∞).

Tabel 2.2 Arvutusmudelis kasutatud mineraalvilla omadused

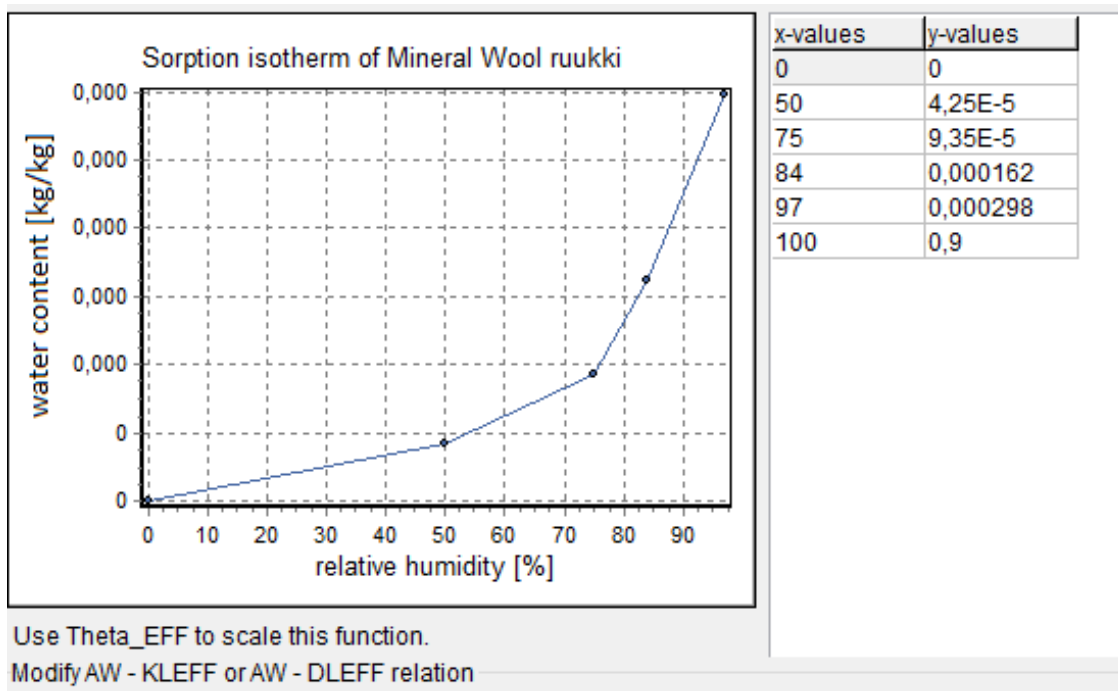
Materjali omadused (põhiväärtused kuivades tingimustes)	Esialgne mineraalvill	Modifitseeritud mineraalvill
Mahumass / tihedus ρ , kg/m ³	67	85
Soojuserimahtuvus c , J/(kg·K)	840	840
Poorsus θ , m ³ /m ³	0,92	0,97
Efektiivne küllastumine θ , m ³ /m ³	0,9	0,9
Soojuserijuhtivus λ , W/(m·K)	0,04	0,037
Vee neelduvuse kordaja A_w , kg/(m·s ^{1/2})	0	0
Veeauru difusioonitakistusetegur μ , -	1	1
Veejuhtivus kl , kg/(m·s·Pa)	0	0



Joonis 2.9 Kuvatõmmis arvutusmodelis koos ääritingimuste ja mõõtmetega



Joonis 2.10 Kivivilla tootja poolne sorptsiooni isothermide graafik



Joonis 2.11 Delphin tarkvaras kivivilla sorptsiooni isothermi graafik

Katsekehade ääritingimustena kasutati katse teostamise kohas katsekehadest 10 sentimeetri võrra kõrgemal asuva anduri poolt saadud temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõteandmeid. Arvutusmudel järgis ajaliselt ja ääritingimustelt reaalse katse kulgu, mis tähendab, et katse ääritingimusi muutes muutusid need ajaliselt samal hetkel ka arvutusmudelil. Võimalikult täpset arvutusmudelit omades avanes

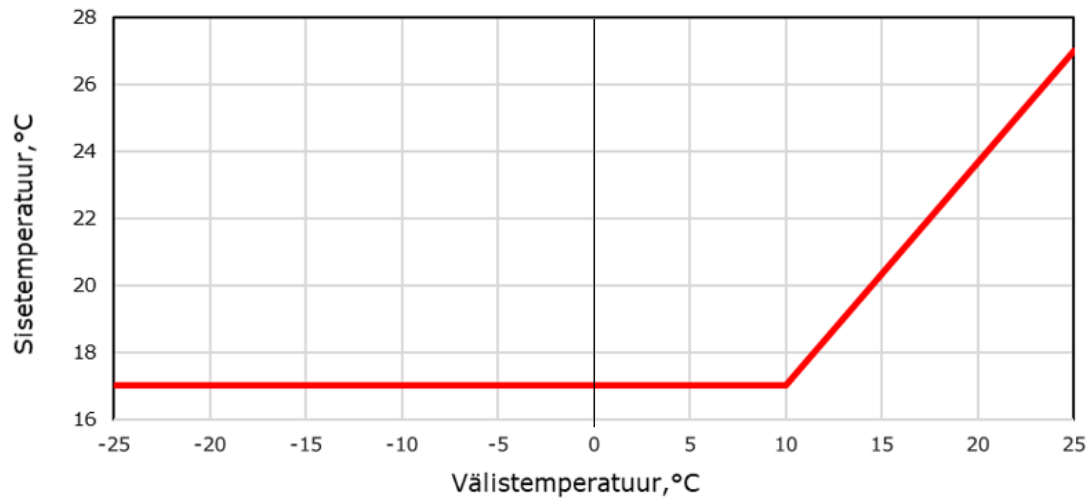
võimalus reaalse pikkusega paneeli niiskuse välja kuivamist hinnata. Selleks on teostatud uus arvutusmudel, kus on kasutatud kalibreeritud arvutusmudeli mineraalvilla ja teipide omadusi.

2.2.3 Kalibreeritud arvutusmudeliga reaalne olukord

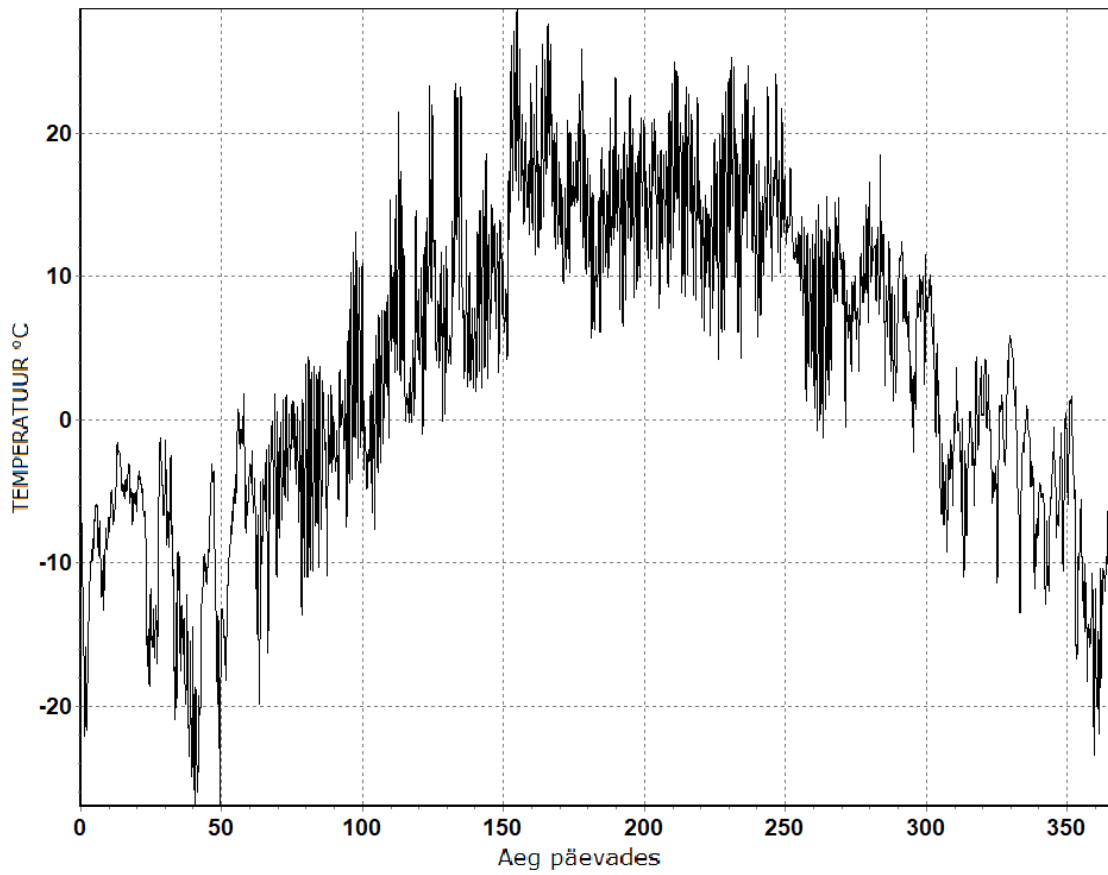
Kalibreeritud arvutusmudeli abil on teostatud edasised arvutused 6m x 1,2m x 0,23m (pikkus x laius x paksus) mõõtmetega sändvitšpaneelis oleva kivivilla väljakuivamise määramiseks Põhjamaade kliimatingimustes. Arvutustes kasutati välise ääritingimusena Väike-Maarja 1995-96 aasta kondensaadi testaasta (Kalamees & Vinha, 2004) kliimaandmeid. Kalibreeritud arvutusmudeli abil arvutati sändvitšpaneelist niiskuse väljakuivamise potentsiaali kahe erineva algniiskuse korral, kui algniiskus oli kogu paneeli ulatuses 0,132 kg/m³ ja 0,3 kg/m³, mis vastavad 6m x 1,2x x 0,23m mõõtmetega paneeli puhul veekogustele 0,22kg ja 0,5kg. Ava, millest niiskus välja saab kuivada on 30mm laiune, mis on võetud reaalselt paigaldust arvestades. Ava on kaetud veeauru läbilaskva (S_d -väärtus 0,05m) teibiga. Hindamaks päikesekiirguse mõju niiskuse väljakuivamisele, on arvutused teostatud ka lääne- ja põhjapoolse päikesekiirguse mõju arvestades.

2.2.4 Reaalse olukorra arvutusmudeli kliima

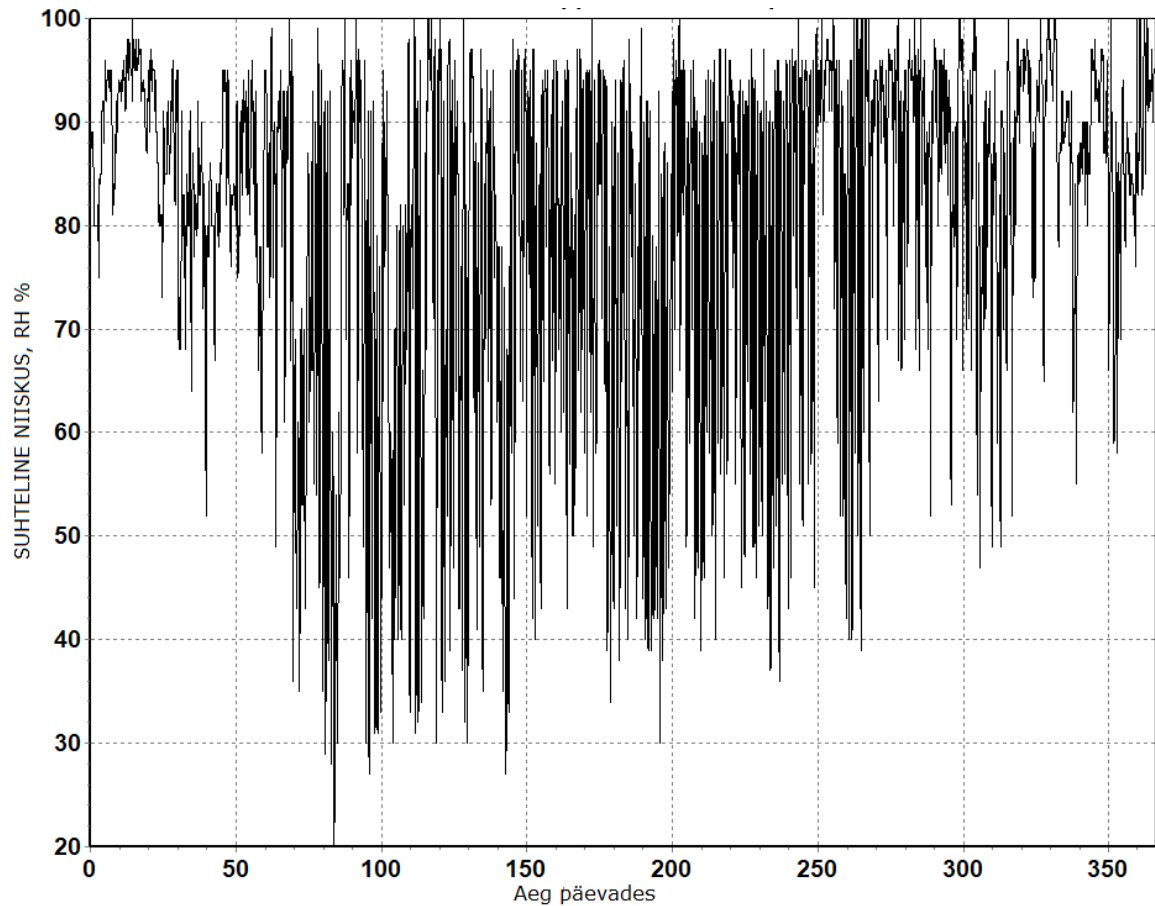
Põhjamaade kliimatingimuste hindamiseks on kasutatud välise ääritingimusena 1995-96 aasta kliimaandmeid (kondensaadi testaasta) (Kalamees & Vinha, 2004). Arvutusperioodi pikkuseks oli 5 aastat, arvutusi alustati jaanuarikuust ning katsekeha algniiskus määrati eeldusel, et paneel on ühtlase niiskussisaldusega terves ulatuses. Arvestatud ei ole vihmaga ega tuulega, kuna katsekehade arvutusmudelitel on tehtud eeldus, et kasutuse käigus vihma näol vett katsekehasse ei satu ja tuul kahe teraslehe vahelist mineraalvilla ei kuivata. Sisetemperatuuri väärtustena on kasutatud (Kalbe et al., 2020) poolt esitatud välistemperatuuri tulemuste põhjal arvutusmudelisse loodud andmeid. Sisetemperatuuri graafik on toodud joonisel 2.12. Väliskliima ääritingimused on näidatud joonisel 2.13 ja 2.14.



Joonis 2.12 Arvutustes kasutatud sisetemperatuuri ääritingimus

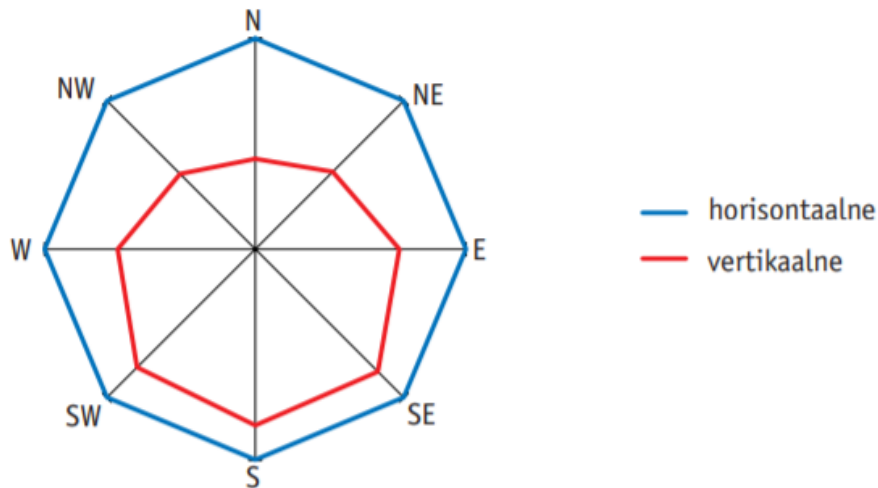


Joonis 2.13 Arvutustes kasutatud väliskliima temperatuur



Joonis 2.14 Arvutustes kasutatud väliskliima suhteline niiskus

Päikese kiirguse mõju arvestamiseks on kasutatud Väike-Maarja 1995-96 kondensaadi testaasta (Kalamees & Vinha, 2004) hajusat ja otsest päikese kiirgust (moodustavad kokku summaarse kiirguse). Päikese kiirguse arvestamisel tehti eeldus, et sändvitšpaneel on halli värvi (ingl. - *medium gray*), mille pinna neelduvustegur on 0,6. Maapinna peegeldusteguri väärtuseks võeti 0,2. Päikese kiirguse puhul on arvestatud paneeli vertikaalse asetusega ja paneeli suundadeks on valitud lääne ja põhja suund. Need ilmakaared on valitud hindamaks madalama ja kõrgema päikese kiirguse mõjuga olukordasid.



Joonis 2.15 Summaarse kiirguse mõju sõltuvalt paneeli asetusest Tõravere näitel (Russak & Kallis, 2003)

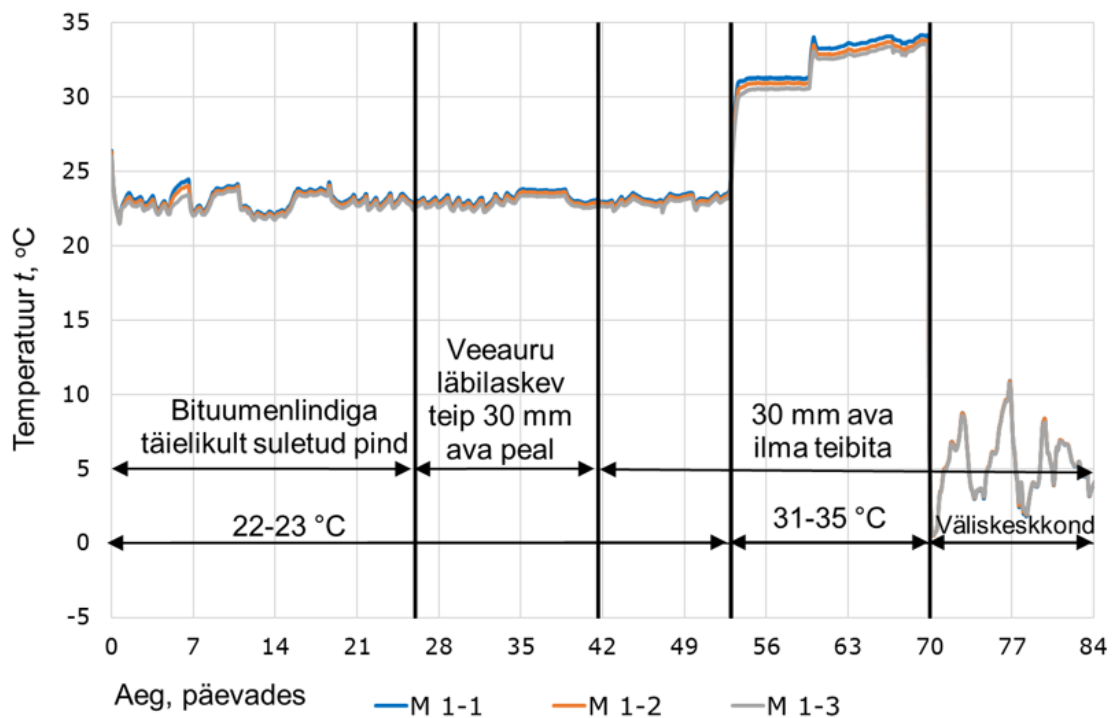
2.2.5 Hindamiskriteeriumid

Käesolevas lõputöös hinnatakse välispiirete niiskustehnilist toimivust hügrokoopse ala ülempiiri ületamisega, mida loetakse arvutustes kriitiliseks olukorraks. Kui antud piir saavutatakse või ületatakse, siis tähendab see villas veeauru muutumist veeks ehk kondenseerumist. Hügrokoopse ala ülempiiri tingimuseks on suhtelise niiskuse väärtus $RH = 97\%$. Standardites EVS-EN 15026 ja EVS-EN ISO 13788 on toodud, et tarandid tuleb ehitada selliselt, et veeauru kondenseerumist, hallituse kasvu ja muul viisil kriitilise suhtelise niiskuse ületamist ei toimuks.

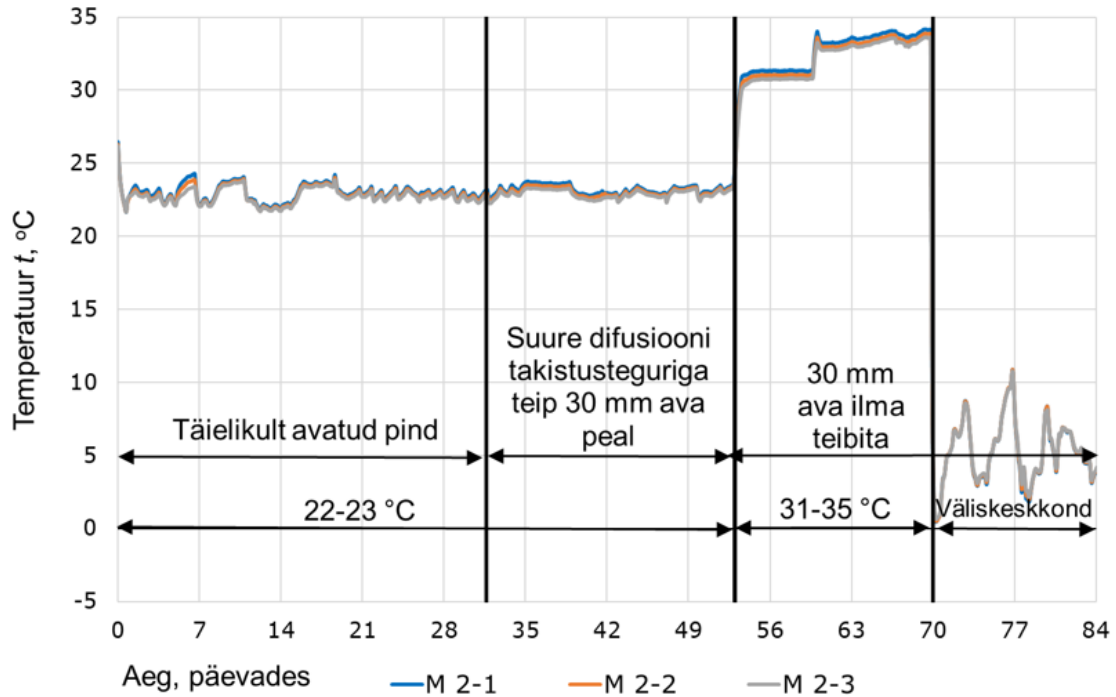
3. ARVUTUSTULEMUSED JA NENDE HINDAMINE

3.1 Katsetulemused

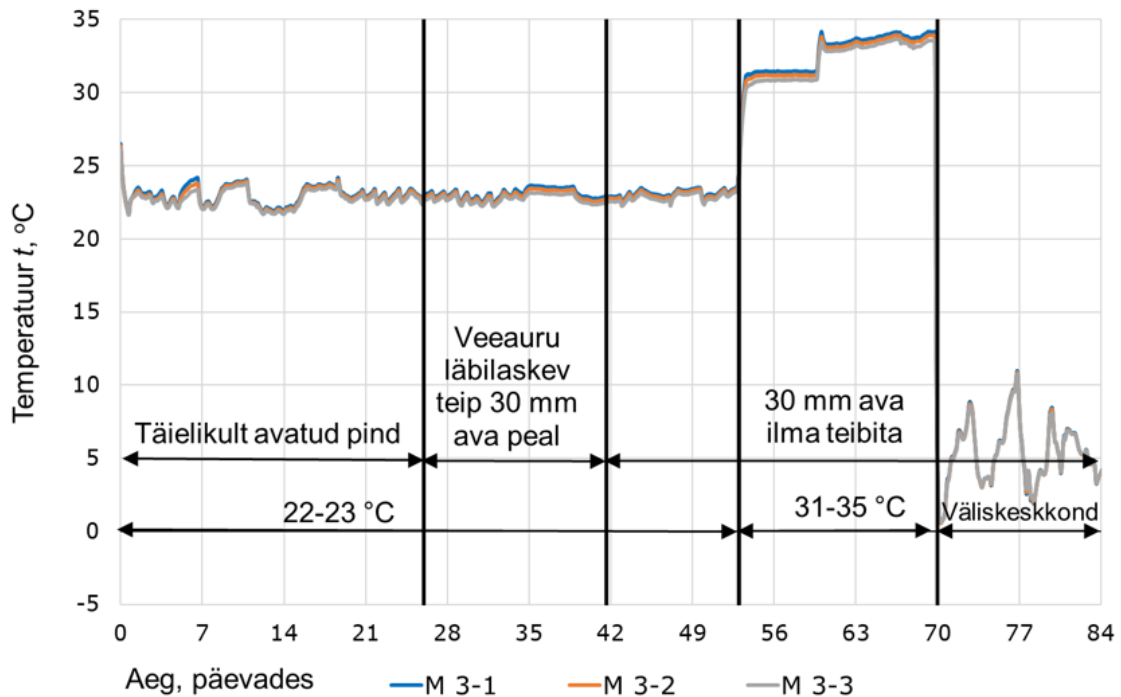
Katse käigus katsekehade registreeritud temperatuuri mõõtmistulemused on kujutatud allolevatel joonistel 3.1, 3.2 ja 3.3 (vastavalt katsekehade 1, 2 ja 3 tulemused). Kuigi tegu on 1,2 meetri kõrguse katsekehaga ning andurid on 300-millimeetrise sammuga, on joonistelt näha, et temperatuurilist kihistumist praktiliselt üldse ei toimu, kuna ääritingimused olid kõigil katsekehadel ühesugused.



Joonis 3.1 Katsekeha 1 temperatuuri mõõtmistulemused



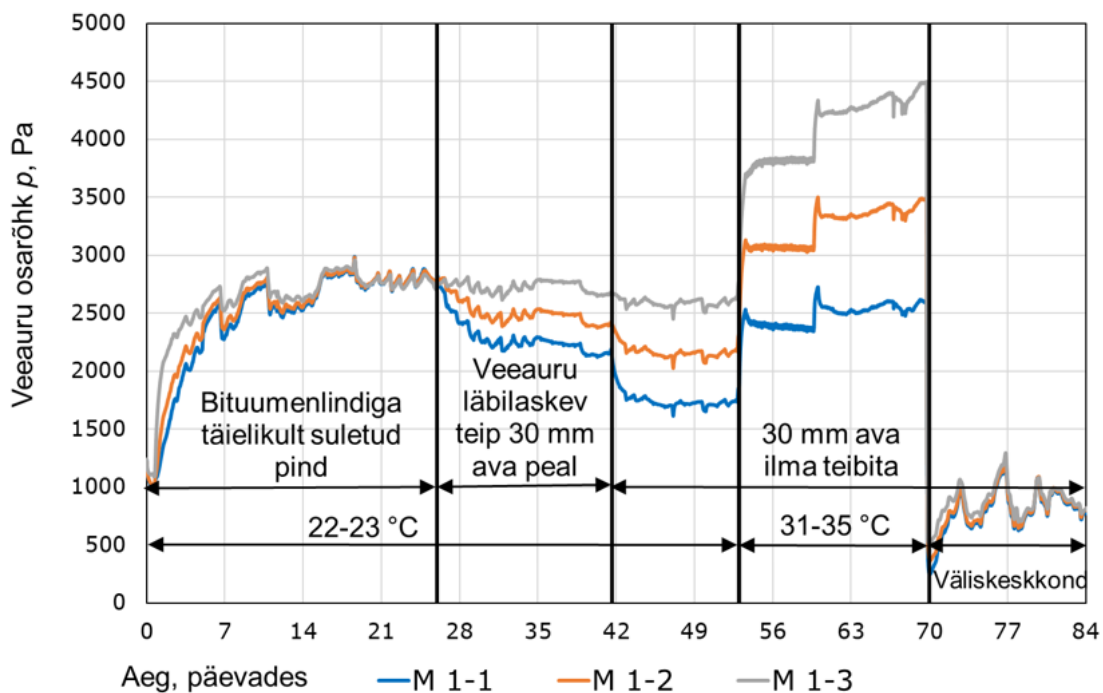
Joonis 3.2 Katsekeha 2 temperatuuri mõõtmistulemused



Joonis 3.3 Katsekeha 3 temperatuuri mõõtmistulemused

Katsekeha 1 katsetulemuste põhjal arvutatud veeauru osarõhu graafikud on toodud alloleval joonisel 3.4. Bituumenlindiga kaetud olukorras, kus katsekeha on täielikult õhu- ja veeaurutihe, tõuseb kogu katsekeha ulatuses veeauru osarõhk ligikaudu

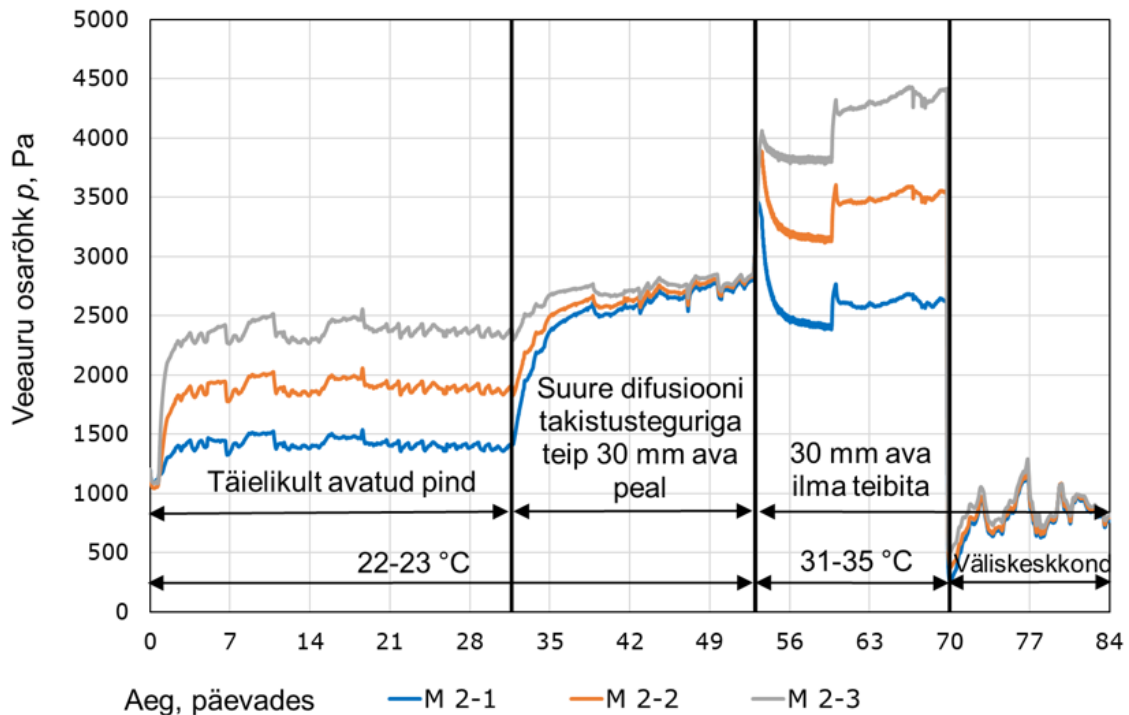
2750 Pa tasemele. 26. päeva lõpus lõigati bituumenlinti 30 mm laiune ja 400 mm pikkune ava, mis kaeti veeauru läbilaskva teibiga (S_d -väärtus 0,05m). Avale lähima anduri 1-1 juures langes veeauru osarõhk 2200 Pa peale ja kõige alumise anduri juures 2600 Pa peale. Veeauru läbilaskva teibiga olukorras hakkas katsekehast niiskust välja kuivama. Pärast 42. päeva, kui veeauru läbilaskev teip eemaldati, vähenesid andurite lähedal veeauru osarõhud veelgi enam, mis viitab suurenevale väljakuivamisele. Teibita olukorras langes 52. päevaks toatemperatuuril anduri 1-1 juures veeauru osarõhk 1600 Pa peale ja anduri 1-3 juures samale tasemele (2600 Pa-ni). Kui 53. päeval temperatuuri tõsteti, tõusid veeauru osarõhud anduri 1-1 juures 2500 Pa juurde ja anduri 1-3 juures 3750 Pa-ni. See on tingitud sellest, et temperatuuritõus suurendas väljakuivamise kiirust ning seetõttu oli ka katsekehas rohkem niiskust, mis rõhku tekitas. 70. päevaks olid andurite 1-1 ja 1-3 juures veeauru osarõhkude tasemed vastavalt 2600 Pa ja 4500 Pa. Väliskeskkonnas teostatud katsetapis langesid veeauru osarõhkude tasemed kogu katsekehas märkimisväärselt ja andurite vahel praktiliselt erinevust ei esinenud.



Joonis 3.4 Katsekeha 1 katselised veeauru osarõhud

Katsekeha 2 katsetulemuste põhjal arvatud veeauru osarõhu graafikud on toodud alloleval joonisel 3.5. Katsekeha jäeti katse alguses pealt täielikult avatuks, et hinnata väljakuivamise kiirust ja uurida materjali veeauru läbilaskevõimet. Jooniselt on näha, et koheselt tekkis veeauru osarõhkude erinevus katsekeha erinevatel

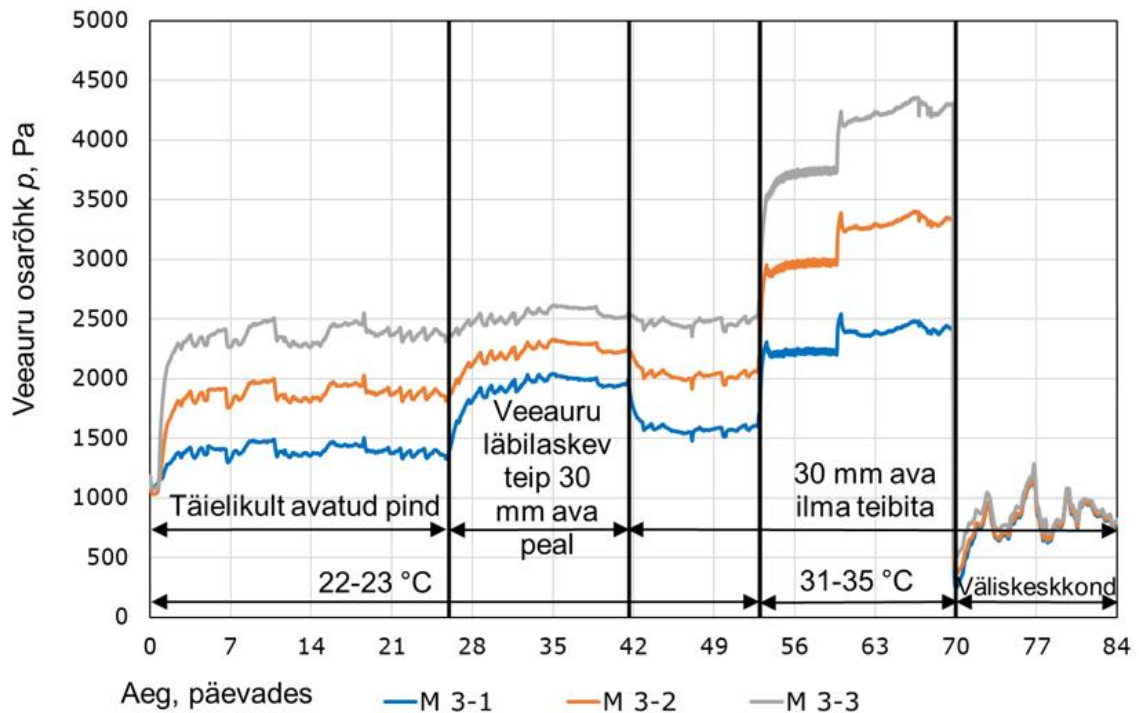
kõrgusel, kuna niiskus kuivas välja katsekeha pinnalt ja katsekeha imas endasse veeauru veeanumale lähima anduri piirkonnas. Avale lähima anduri 2-1 juures jäi veeauru osarõhk tasemele 1400 Pa ja veeanumale lähima anduri 2-3 juures 2400 Pa. 32. päeval kaeti katsekeha pealt fooliumiga ja jäeti vaid 30 mm laiune ja 400 mm pikkune ava suure difusioonitakistusega teibi (S_d -väärtus 15m) katsetamiseks. Seejärel tõusid veeauru osarõhud kogu katsekeha ulatuses võrdsele tasemele. 52. päevaks kattusid veeauru osarõhu graafikud omavahel ja veeauru osarõhu tase oli kogu paneeli ulatuses 2750 Pa, mis viitab sellele, et niiskuse väljakuivamist ei toimu. Pärast 52. päeva, kui eemaldati suure difusiooni takistusteguriga teip ava pealt ja tõsteti ruumitemperatuuri, tõusis esialgu terves katsekehas veeauru osarõhkude tase. 56. päeval on selgelt näha suuri erinevusi veeauru osarõhkudes katsekeha erinevatel kõrgustel, mis viitab niiskuse väljakuivamisele katsekehast. Enne väliskeskonna katsetappi langes ülemise anduri 2-1 juures veeauru osarõhk 2600 Pa-ni ja kõige alumise anduri 2-3 juures tõusis 4400 Pa peale. Väliskeskonnas langes veeaurude osarõhu tase kogu katsekehas märkimisväärselt ja 14 päeva vältel jäid veeauru osarõhud vahemikku 700...1200 Pa. Katsekeha erinevatel kõrgustel veeauru osarõhkude erinevust praktiliselt ei esinenud, kuna katsekehas toimus niiskustaseme ühtlustumine.



Joonis 3.5 Katsekeha 2 katselised veeauru osarõhud

Katsekeha 3 katsetulemuste põhjal arvatud veeauru osarõhu graafikud on toodud alloleval joonisel 3.6. Katset alustati sarnaselt katsekehale 2, kus pealmine pind oli täielikult avatud ning ka veeauru osarõhu tasemed muutusid sarnaselt. 26. päevaks on avale lähima anduri 3-1 juures veeauru osarõhu tase 1400 Pa ja veeanumale lähima anduri 3-3 juures 2400 Pa. 26. päeval kui katsetati veeauru läbilaskvat teipi (S_d -väärtus 0,05m) 30 mm aval tõusid veeauru osarõhu tasemed katsekehas. 42. päevaks oli anduri 3-1 asukohas veeauru osarõhu tase 2000 Pa ja anduri 3-3 asukohas 2500 Pa. Veeauru osarõhkude erinevus erinevatel kõrgustel vähenes ajavahemikus 26...42 päeva, mis viitab veeauru väljakuivamise aeglustumisele, sest teibi tõttu ühtlustus niiskustase katsekehas. Kui 42. päeval veeauru läbilaskev teip eemaldati, tekkis koheselt erinevus veeauru osarõhkude vahel ja saavutati peaaegu samasugune tase nagu katse alguses täielikult avatud pinna puhul. 52. päevaks oli anduri 3-1 asukoha juures veeauru osarõhu tase 1600 Pa ja anduri 3-3 asukohas 2500 Pa. Kui temperatuuri tõsteti, tõusid ka veeauru osarõhud, samuti suurenes osarõhkude erinevus. 70. päevaks oli anduri 3-1 juures veeauru osarõhu tase 2450 Pa ja anduri 3-3 juures 4300 Pa. Väliskeskkonnas teostatud katsetapis langes veeaurude osarõhu tase kogu katsekehas drastiliselt ja 70...84 päeva vahemikus jäid

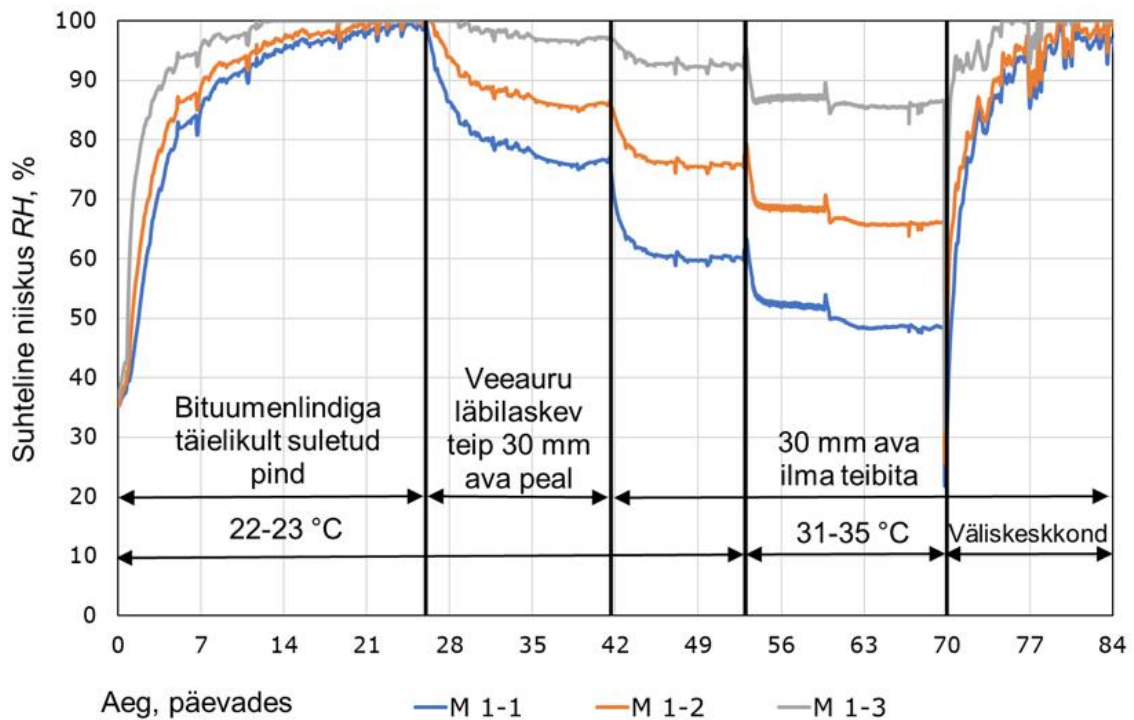
veeauru osarõhud vahemikku 700...1200 Pa. Katsekeha erinevatel kõrgustel veeauru osarõhkude erinevust praktiliselt ei esinenud.



Joonis 3.6 Katsekeha 3 katselised veeauru osarõhud

Katsekeha 1 andurite poolt registreeritud suhtelise niiskuse mõõtmistulemused on näidatud joonisel 3.7. Jooniselt on näha, et katsekehas langeb kõrguse kasvades suhteline niiskus, mis tähendab, et niiskus kuivab materjalist välja. Kui katsekeha on täielikult bituumenlindiga kaetud (täielikult õhu- ja veeaurutihe), tõuseb suhtelise niiskuse tase terves katsekehas 100%-ni 26 päevaga, sest veeauru väljakuivamine on takistatud ja niiskustase ühtlustub terves katsekehas. Olukorras, kus katsekeha ava peal oli veeauru läbilaskev teip (S_d -väärtus 0,05m), langes päevadel 26 - 32 suhtelise niiskuse tase anduri 1-1 juures 100%-lt $\approx 80\%$ -le. Kõige madalamal asetsev andur 1-3 registreeris suhtelise niiskuse langust 100%-lt $\approx 97\%$ -le. Katsekeha saavutas 36. päevaks tasakaaluniiskuse. Pärast 42. päeva eemaldati avalt veeauru läbilaskev teip ning sellest tulenevalt suhteline niiskus vähenes, kuna niiskus sai intensiivsemalt välja kuivada. See võib olla tingitud sellest, et veeauru läbilaskev teip takistas niiskuse väljakuivamist ning teibi eemaldamisel lisatakistus vähenes, mis omakorda kiirendas kuivamisprotsessi. Avale lähima anduri 1-1 juures langes 44. päeval suhteline niiskuse tase 60% peale. Veeanumale lähima anduri 1-3 juures langes suhtelise niiskuse tase 93% peale. Ruumitemperatuuri tõstmine soodustas niiskuse väljakuivamist veelgi. 60. päeval tõsteti katseruumis temperatuur 31 °C

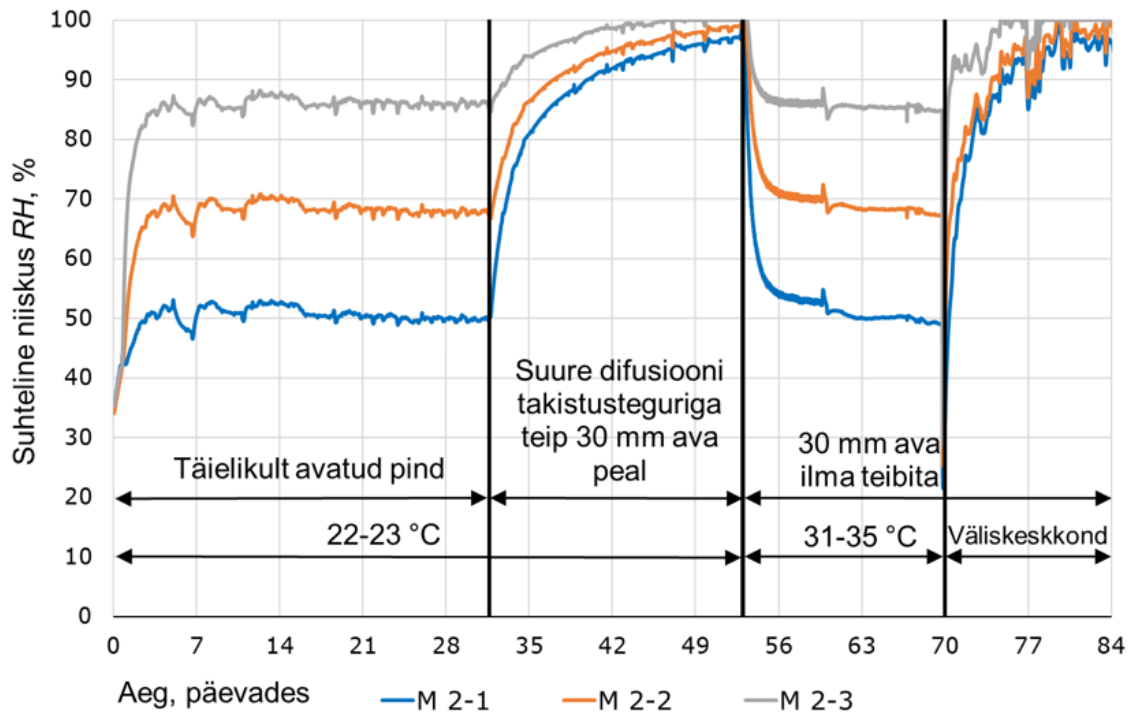
pealt 35 °C peale, sellest tingituna on näha ka muudatused suhtelise niiskuse graafikul. Suhteline niiskus langes 70. päeval anduri 1-1 juures 49% ja anduri 1-3 juures 86% peale, kuna temperatuuri tõusuga suurenes küllastunud veeauru osarõhk. Pärast katsekeha tõstmist väliskeskkonda tõusis suhtelise niiskuse tase terves katsekehas 95-100% peale. See tuleneb sellest, et suhteline niiskus õues oli 98-100%.



Joonis 3.7 Katsekeha 1 suhtelise niiskuse mõõtmistulemused

Katse alguses oli katsekeha 2 pealt täielikult avatud, hindamaks materjali veeauru läbilaskevõimet. Anduri poolt registreeritud mõõtetulemused on toodud joonisel 3.8. Jooniselt on näha, et pealt avatud katsekehas tekib niiskuse kihistumine, mis tähendab, et niiskus kuivab katsekehast välja. Avale lähim andur 2-1 registreeris 32. päeval suhtelise niiskuse tasemeks 50% ja veeanumale lähim andur 2-3 86%. Hiljem kaeti pealmine pind fooliumiga, kuhu jäeti 30 mm laiune ja 400 mm pikkune ava, mis omakorda suleti veeauru tõkestava kõrge difusiooni takistusteguriga (S_d -väärtus 15m) teibiga. Pärast seda tõusis suhteline niiskus kogu paneelis 52. päevaks tasemele 96-100%, kuna veeaurul polnud võimalik välja kuivada ja niiskustase paneelis ühtlustus. Pärast teibi eemaldamist langes suhteline niiskus katsekehas kiiresti. 56. päeval registreeris andur 2-1 suhtelise niiskuse tasemeks 55% ja andur 2-3 85%. Väike muutus ja suhtelise niiskuse taseme langus 60. päeval tuleneb sellest, et katseruumis tõsteti temperatuur 31 °C pealt 35 °C peale. Väliskeskkonda

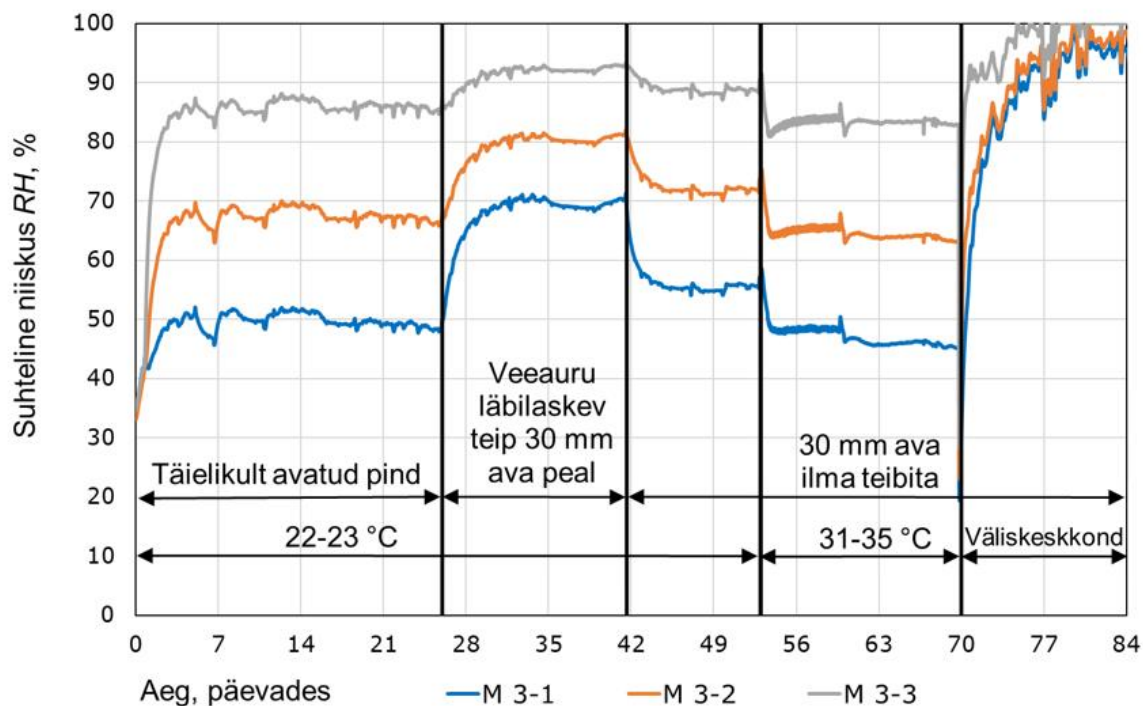
tõsteti katsekeha 70. päeval, pärast väliskeskonda tõstmist tõusis suhteline niiskus väga kiiresti, kuna langes temperatuur ning väliskeskonnas oli suhtelise niiskuse tase 98...100%. Katse lõpuks oli terves katsekehas suhteline niiskus vahemikus 95...100%.



Joonis 3.8 Katsekeha 2 suhtelise niiskuse mõõtmistulemused

Kolmanda katsekeha andurite poolt registreeritud suhtelise niiskuse mõõtmistulemused on näidatud joonisel 3.9. Jooniselt on näha, et olukorras kus katsekeha pealmine pind on täielikult avatud, toimub niiskuse kihistumine nagu katsekehas 2 (vt joonis 3.8). See näitab, et niiskus kuivab katsekehast välja. Andur 3-1 registreeris 26. päeval suhtelise niiskuse tasemeks 49% ja andur 3-3 85%. Pärast 26. päeva katsetati 30mm avaga olukorda ja ava kaeti veeauru läbilaskva teibiga (S_d -väärtus 0,05m). See tõstis suhtelise niiskuse taset märkimisväärselt. Teip võimaldas veeaurul katsekehast välja kuivada, kuid mitte nii hästi kui avatud olukorras. Suhtelise niiskuse tase tõusis 42. päevaks anduri 3-1 juures 70%-le ja anduri 3-3 juures 93%-le. Teip eemaldati ja samade ääritingimuste puhul langes suhteline niiskus 54. päevaks avale lähima anduri 3-1 juures tasemele 56% ja veeanumale lähima anduri 3-3 juures 89%. Suhteline niiskus ei langenud samale tasemele, mis oli täielikult avatud pinna puhul. Seda seetõttu, et väiksema ava puhul on katsekeha peal suur osa pinnast kaetud ja see takistab veeaurul välja kuivamast. Kui 56. päeval katseruumis temperatuuri tõsteti registreerisid andurid ka suhtelise

niiskuse languse. 70. päeval registreerisid andur 3-1 suhtelise niiskuse tasemeks 47% ja andur 3-3 83%. Katsekeha tõstmisel väliskeskonda tõusis suhteline niiskus terves katsekehas kiiresti ja 84. päevaks oli terves katsekehas suhtelise niiskuse tase 95...100%.

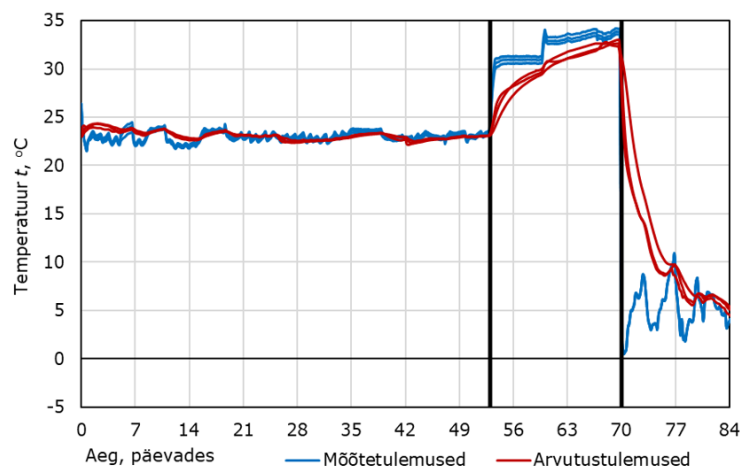


Joonis 3.9 Katsekeha 3 suhtelise niiskuse mõõtmistulemused

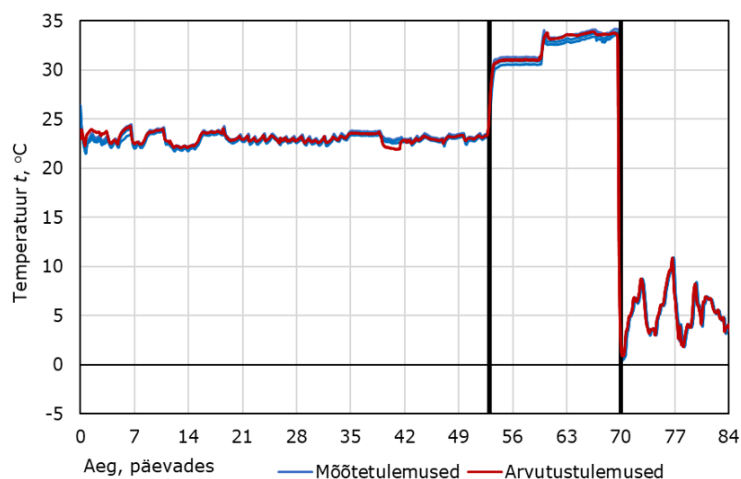
3.2 Ühe- ja kahemõõtmeliste arvutusmodelite võrdlus

Katsetulemustele vastavad arvutusmodelid on koostatud Delphin 5.9.6 tarkvara abil. Esiolgu alustati ühemõõtmelise (1D) arvutusmodeli koostamisega. Arvutusmodeli kalibreerimise käigus selgus, et 1D arvutusmodelit ei õnnestu seadistada selliselt, et arvutusmodeli tulemused ühtiksid katsetulemustega. Katseruumis äkilisi temperatuuri muudatusi tehes ei ennusta 1D arvutusmodel korrektselt temperatuurimuutusi (vt joonis 3.10). Põhjuseks see, et 1D arvutusmodel arvestab ainult katsekeha ülemisele ja alumisele pinnale mõjuva temperatuuriga, kuid ei arvesta katsekehade külgedelt temperatuuri mõjuga. Seetõttu tuli kalibreerimine 1D arvutusmodelit kasutades lõpetada.

Ühemõõtmelise arvutusmodeli ebapiisavast täpsusest tingituna alustati kahemõõtmelise (2D) arvutusmodeli loomise ning kalibreerimisega. 2D arvutusmodeli abil saavutati piisavalt täpne tulemus, millega võis alustada reaalse olukorra arvutamist ja hindamist (vt joonis 3.11).



Joonis 3.10 Mõõteanduri ja 1D arvutusmodeli tulemuste temperatuuri võrdlus



Joonis 3.11 Mõõteanduri ja 2D arvutusmodeli tulemuste temperatuuri võrdlus

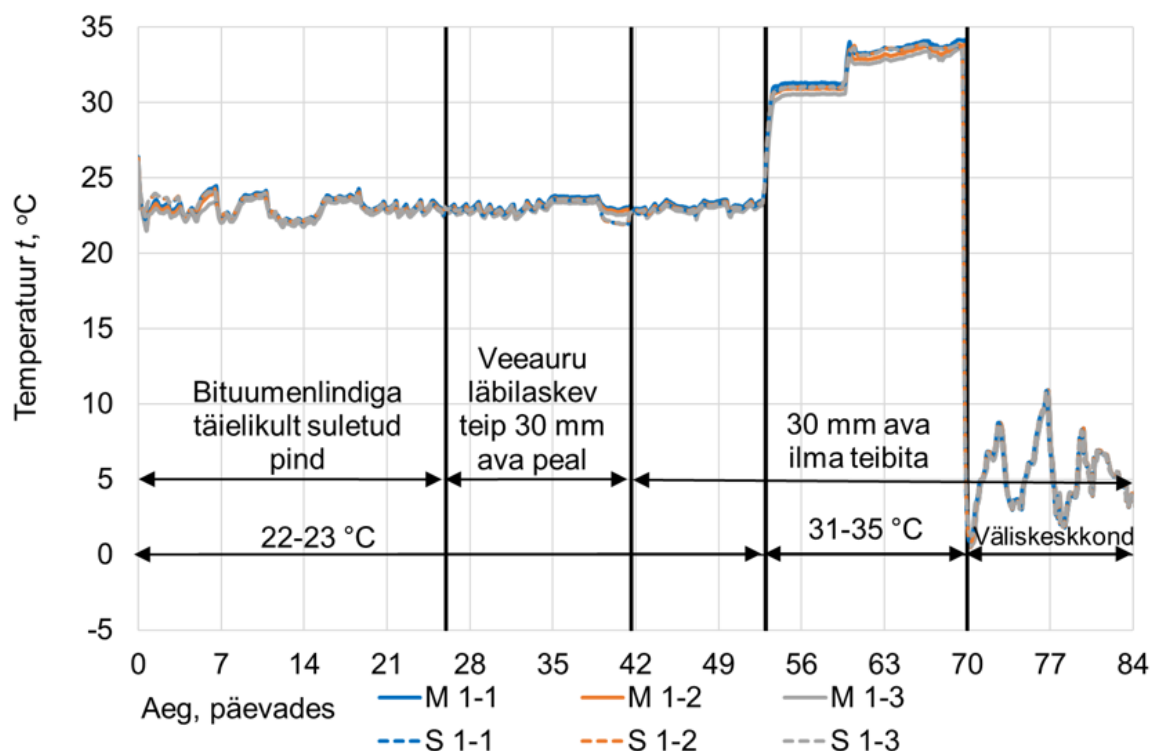
3.3 Arvutustulemuste võrdlus katsetulemustega

Järgnevates alapeatükkides on joonistel toodud katsekehade mõõtetulemused ja vastava mudeli arvutustulemused. Kõikide katsekehade arvutustulemused on markeeritud S-iga (simuleeritud) ja mõõtetulemused on markeeritud M-iga (mõõdetud). Katsekehade mõõtetulemused on toodud erinevatel kaugustel veetasemest asetsevate andurite järgi. Kõige kõrgemal asetsev andur on

markeeritud sinise värviga, katsekeha keskel asetsev andur oranži värviga ja kõige madalamal asetsev andur halli värviga. Mõõtetulemused on joonistel esitatud pideva joonena ja mudeli arvutustulemused katkendjoonega. Arvutustulemused on esitatud sama värviga nagu mõõtetulemused. Alapeatükkides on esitatud katsekehade temperatuuri, veeauru osarõhkude, suhtelise niiskuse ja niiskuse väljakuivamise määr.

3.3.1 Katsekeha 1 mõõtetulemuste võrdlus arvutustulemustega

Katsekeha 1 temperatuuri arvutuslikud ja katselised graafikud katsekeha erinevatel kõrgustel on toodud joonisel 3.12. Arvutuslike ja katseliste temperatuuride erinevus on marginaalne. Katses esinenud väikesed temperatuuri kõikumised kajastuvad ka arvutustulemustes. Arvutusmudel järgib üsna täpselt katses välitingimuste muutmisel tekkinud temperatuuri muutuseid. Katseseina 1 temperatuuri arvutustulemusega võib rahule jääda, sest need järgivad väga täpselt temperatuuri muutust katses.

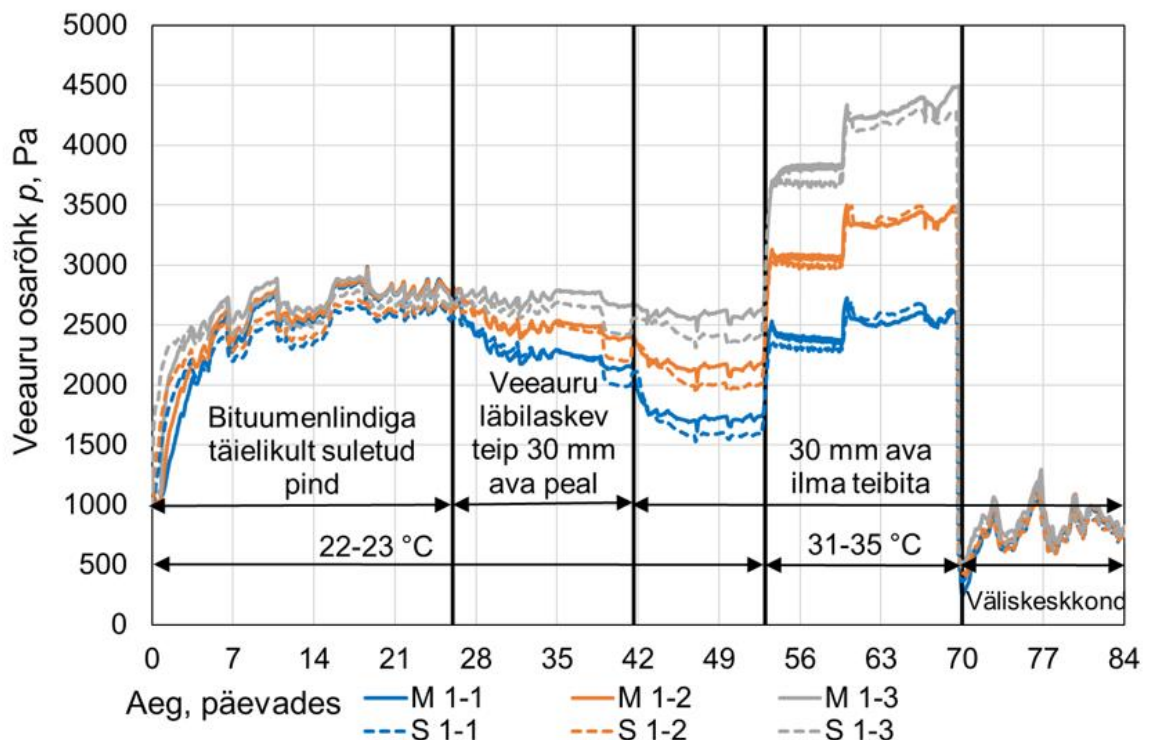


Joonis 3.12 Katsekeha 1 katselised ja arvutuslikud temperatuurid

Veeauru osarõhkude arvutuslikud ja katsetulemuste abil arvutatud väärtused katseseina 1 erinevatel kõrgustel on toodud joonisel 3.13. Täielikult kaetud pealmise

pinna korral (joonisel päevad 0-26) oli arvutustulemuste ja katsetulemuste keskmine erinevus 125 Pa. Olukorras, kus katsekeha pealmisel pinnal olevat 30 mm laiust ja 400 mm pikkust ava kattis veeauru läbilaskev teip, oli mudeli arvutustulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes 100 Pa. Kõige suurem arvutusliku ja katsetulemuste erinevus oli perioodil 42 – 54 päeva. Teibita ava katsetapi arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katses saadud tulemuste suhtes oli 175 Pa. Temperatuuri tõustes 52. päeval veeauru osarõhkude erinevus vähenes, arvutuslike ja katse käigus registreeritud keskmine tulemuste erinevus oli katselõigis 50 Pa. Väliskeskonna arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katselise tulemusega võrreldes oli 20 Pa.

Võrreldes temperatuurigraafikuga (vt joonis 3.12), erinevad veeauru osarõhu graafikul arvutuslikud tulemused pisut katselistest tulemustest. Temperatuurigraafikul esinenud väiksemad erinevused arvutuslikes ja katselistes tulemustes esinevad ka veeauru osarõhu graafikul. Seda seetõttu, et veeauru osarõhu väärtus on otseses sõltuvuses temperatuurist ja suhtelisest niiskusest. Järelikult on arusaadav, et osarõhkude tulemuste erinevused on kohtades, kus olid ka suuremad arvutuslikud ja katselised temperatuurierinevused.



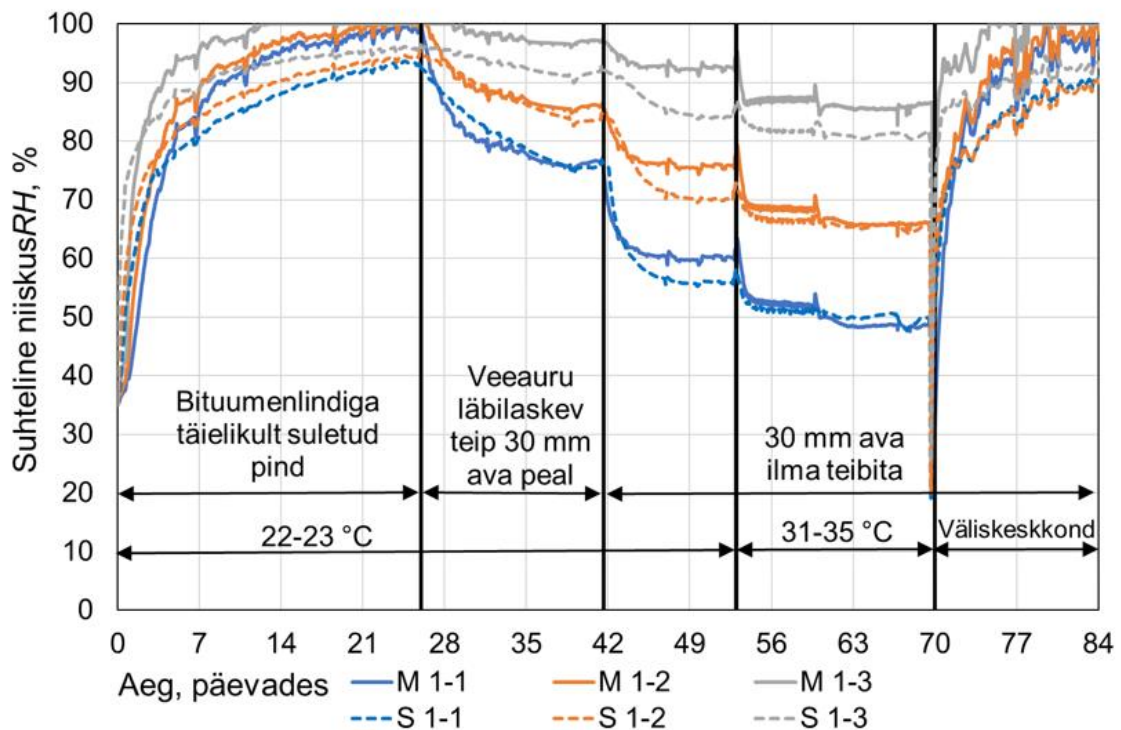
Joonis 3.13 Katsekeha 1 katselised ja arvutuslikud veeauru osarõhud

Suhtelise niiskuse arvutuslikud ja katselised tulemused on alloleval joonisel (vt joonis 3.14). Täielikult kaetud pinna korral (joonisel päevad 0-26) oli

arvutustulemuste ja katsetulemuste keskmine erinevus 6%. Olukorras, kus katsekeha pealpool olevat 30 mm laiust ava kattis veeauru läbilaskev teip, oli mudeli arvutustulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes 4%. Kõige suurem arvutusliku ja katsetulemuste erinevus oli 42. – 54. päeva vahel. Teibita ava katsetapi arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katses saadud tulemuste suhtes oli 7%. Temperatuuri tõustes 52. päeval vähenes suhtelise niiskuse erinevus katse- ja arvutuslike tulemuste vahel, keskmine tulemuste erinevus oli katselõigis 4%. Väliskeskonna arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katselise tulemusega võrreldes oli 7%.

Jooniselt 3.14 on näha, et kõige suuremad arvutuslike ja katseliste graafikute tulemuste erinevused on ajavahemikus 42- 84 päeva. Suurim erinevus on andur 1-3 asukoha juures (5-9%), mis asus katsekehas kõige madalamal. Selles asukohas on arvutustarkvara Delphin hinnanud suhtelise niiskuse oluliselt madalamaks kui registreeriti katse käigus. Suur erinevus võib olla tingitud materjaliomaduse erinevusest.

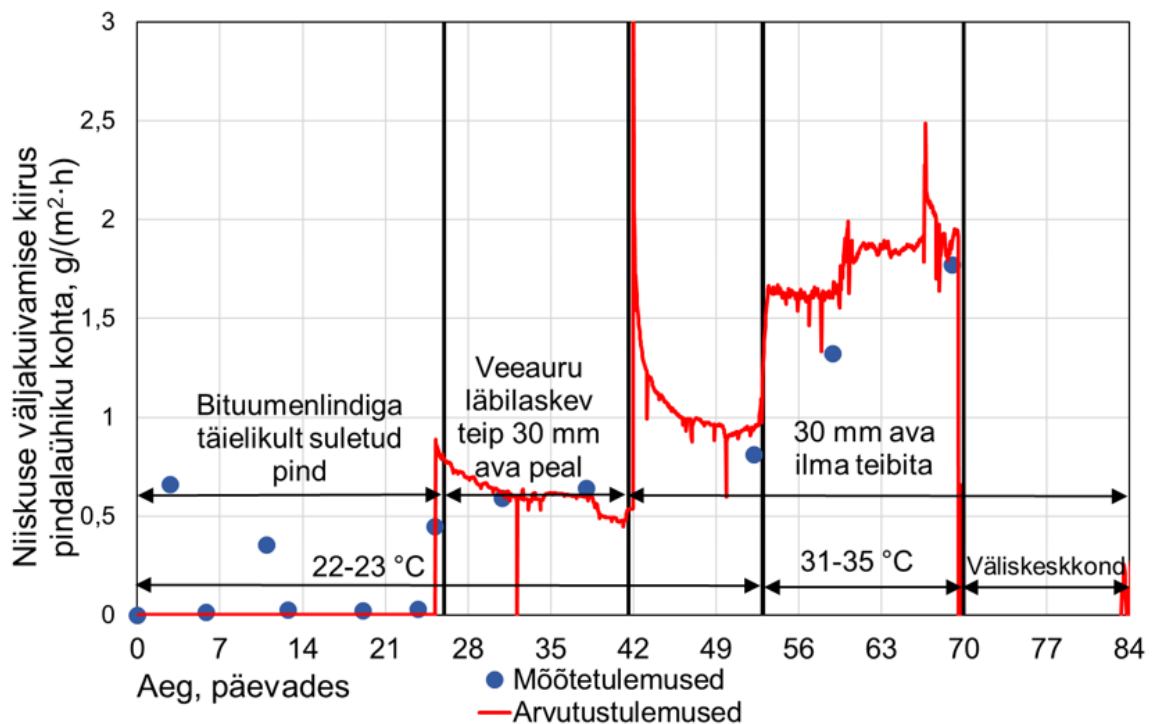
Mõõteandurite suhtelise niiskuse mõõtetäpsus on vahemikus $\pm 2,5...3,5\%$ ning üle 90% suhtelise niiskuse taseme korral $\pm 5\%$. Seda arvestades saab arvutusmudeli täpsust hinnata heaks, kuna keskmine erinevus andurite juures on $\pm 6\%$.



Joonis 3.14 Katsekeha 1 katselised ja arvutuslikud suhtelised niiskused

Joonisel on toodud nii katsekeha katselised kui arvutuslikud niiskuse väljakuivamise voo tulemused (vt joonis 3.15). Mõõtetulemused, kus katsekehasid kaaluti ja selle kaudu niiskuse väljakuivamist arvatati, on markeeritud punktidenä ja mitte joonena. Seda seetõttu, et kaalumispunkte on niivõrd vähe, et see looks ebatäpse graafiku mõõtetulemuste kohta.

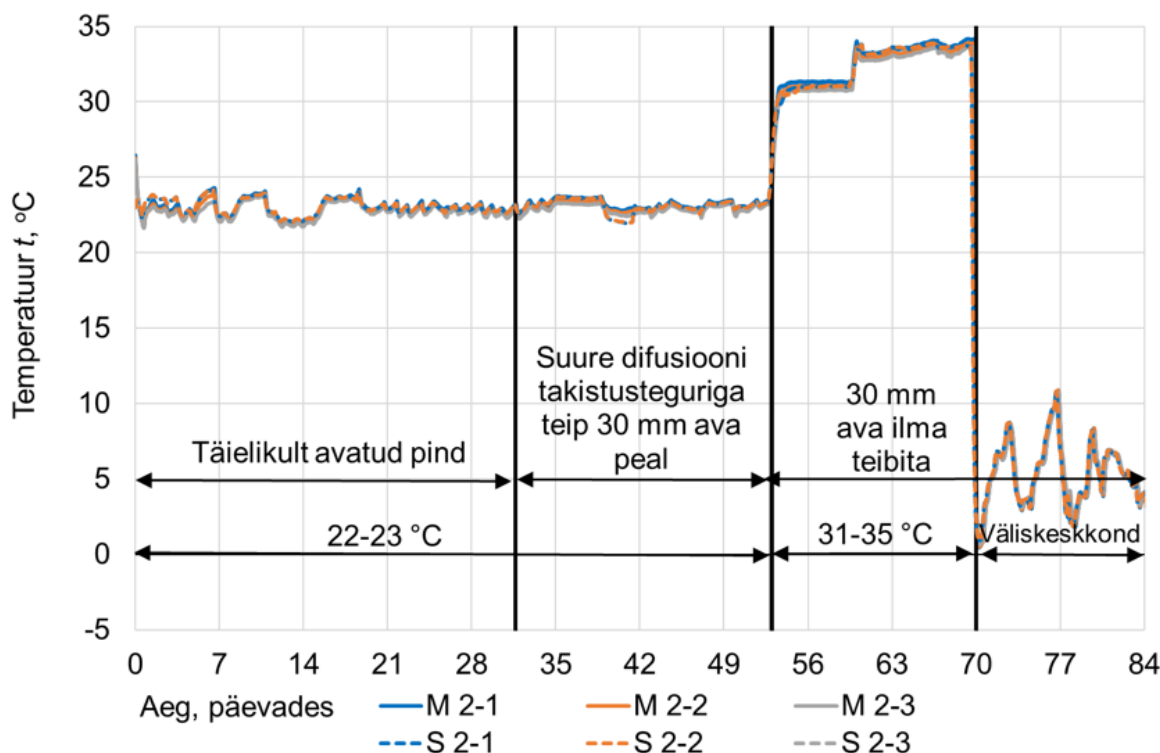
Jooniselt 3.15 on näha, et arvutuslikud ja katselised tulemused langevad kokku üsna täpselt. Katse mõõtetulemused on võrdsed või jäävad pisut alla arvutusmudeliga saadud tulemustele. Kuigi arvutusmudeli tulemuste kohaselt bituumenlindiga täielikult kaetud olukorras katsekehas niiskust välja ei kuivanud, on näha, et 3. ja 11. päeval on mõõtetulemuste kohaselt veeauru katsekehas välja kuivanud. Selle põhjuseks võib olla, et vahetult enne neid päevi on katsekeha täiendatud fooliumteibiga ning korrigeeritud katsekeha isoleeritust. Fooliumteibiga tehtud täienduste käigus on osa katsekehas olevast veeaurust välja pääsenud. Väga äkilised tõusud arvutusmudeli graafikus annavad mõista, et katselõike muutes on katsekehas vabanenud suures koguses niiskust.



Joonis 3.15 Katsekeha 1 katselised ja arvutuslikud niiskuse väljakuivamise voo tulemused

3.3.2 Katsekeha 2 mõõtetulemuste võrdlus arvutustulemustega

Katsekeha 2 arvutuslikud ja katselised temperatuurigraafikud erinevatel kõrgustel on toodud joonisel 3.16. Arvutuslike ja katseliste temperatuuride erinevus on tühine. Katses esinenud temperatuurimuutused kajastusid ka arvutusmodeli arvutustulemustes. Katseseina 2 temperatuuri arvutustulemusega võib rahule jääda, sest need järgivad väga täpselt temperatuuri muutust kogu katse ajal.

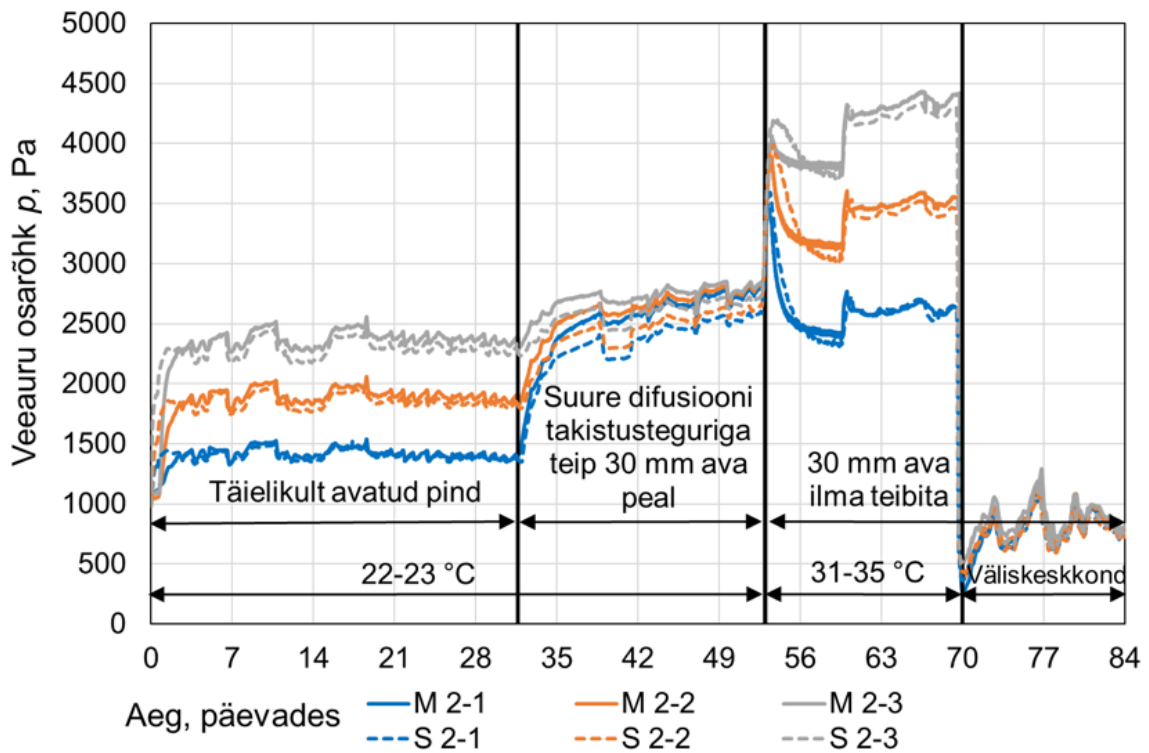


Joonis 3.16 Katsekeha 2 katselised ja arvutuslikud temperatuurid

Veeauru osarõhkude arvutuslikud ja katsetulemuste abil arvatud väärtused katseseina 2 erinevatel kõrgustel on toodud joonisel 3.17. Täielikult avatud pinna puhul (joonisel päevad 0-32) oli arvutustulemuste ja katsetulemuste keskmine erinevus 40 Pa. Kõige suurem arvutuslike ja katsetulemuste erinevus oli vahemikus 32 – 54 päeva. Olukorras, kus katsekeha pealmisel pinnal olevat 30 mm laiust ava kattis suure difusiooni takistusteguriga teip, oli mudeli arvutustulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes 100 Pa. Teibita ava katsetapi arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katses saadud tulemuste suhtes oli 50 Pa. Väliskeskonna arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katselise tulemusega võrreldes oli 20 Pa.

Võrreldes temperatuurigraafikuga (vt joonis 3.16), erinevad veeauru osarõhu graafikul arvutuslikud tulemused pisut katselistest tulemustest.

Temperatuurigraafikul esinenud väiksemad erinevused arvutuslikes ja katselistes tulemustes esinevad ka veeauru osarõhu graafikul. Seda seetõttu, et veeauru osarõhu väärtus on otseses sõltuvuses temperatuurist ja suhtelisest niiskusest. Järelikult on arusaadav, et osarõhkude tulemuste erinevused on kohtades, kus oli ka suuremad arvutuslikud ja katselised temperatuuri erinevused.



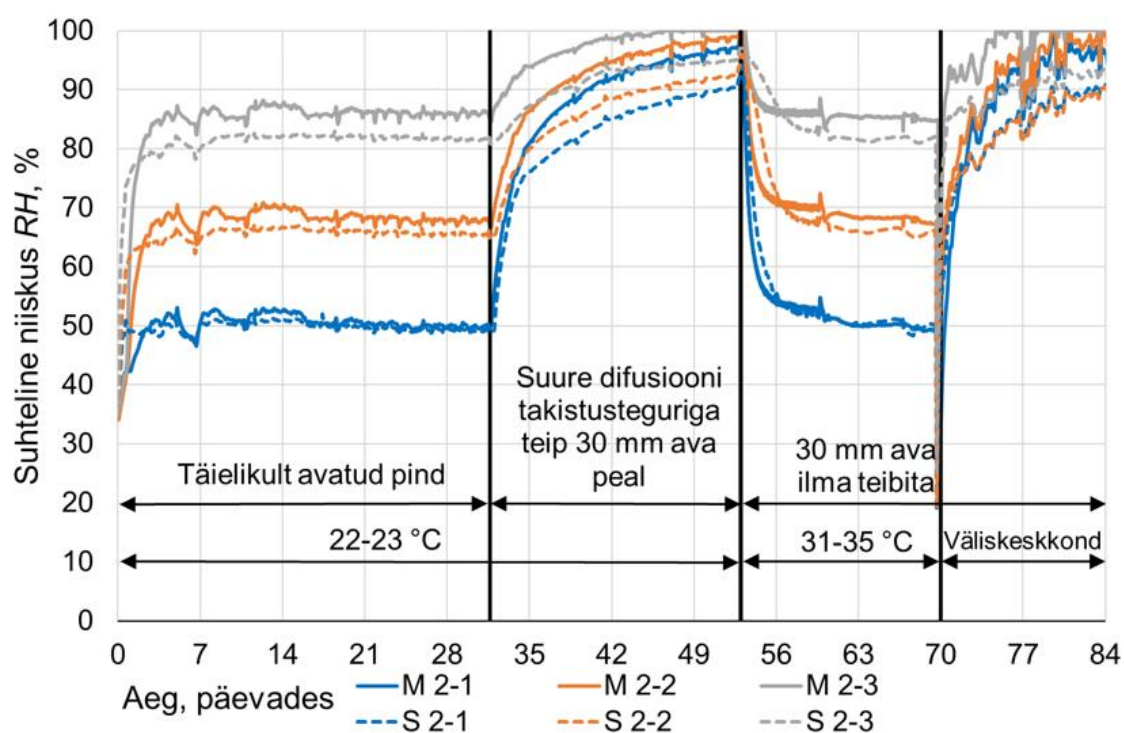
Joonis 3.17 Katsekeha 2 katselised ja arvutuslikud veeauru osarõhud

Suhtelise niiskuse arvutuslikud ja katselised tulemused on toodud alloleval joonisel (vt joonis 3.18). Täielikult avatud pinna puhul (joonisel päevad 0-32) oli arvutustulemuste ja katsetulemuste keskmine erinevus 4%. Kõige suurem arvutusliku ja katsetulemuste erinevus oli 32. – 54. päeva vahel, kus katsekeha pealmisel pinnal olevat 30 mm laiust ava kattis suure difusiooni takistusteguriga teip. Mudeli arvutustulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes oli 7%. Teibita ava katsetapi arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katses saadud tulemuste suhtes oli 3%. Väliskeskonna arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katselise tulemusega võrreldes oli 6%.

Jooniselt 3.18 on näha, et kõige suuremad arvutuslike ja katseliste graafikute tulemuste erinevused on ajavahemikus 32- 54 päeva. Kirjeldatud ajavahemikus on eristatavad erinevused kõikide andurite asukohtade juures (erinevused vahemikus 6% kuni 8%). Nendes asukohtades on arvutustarkvara Delphin hinnanud suhtelise niiskuse oluliselt madalamaks kui on registreeritud katse käigus. Üheks erinevuse

põhjuseks võib-olla asjaolu, et teibi deklareeritud suhteline difusioonitakistustegur on tegelikkuses madalam. Kasutades mudelis madalamat difusioonitakistustegurit ei tõuse arvutusmudeli tulemused nii kõrgele tasemele kui tegelikkuses. Väike erinevus kogu katse vältel arvutuslike ja katseliste tulemuste vahel võib tuleneda modelleerimise mõningasest ebatäpsusest.

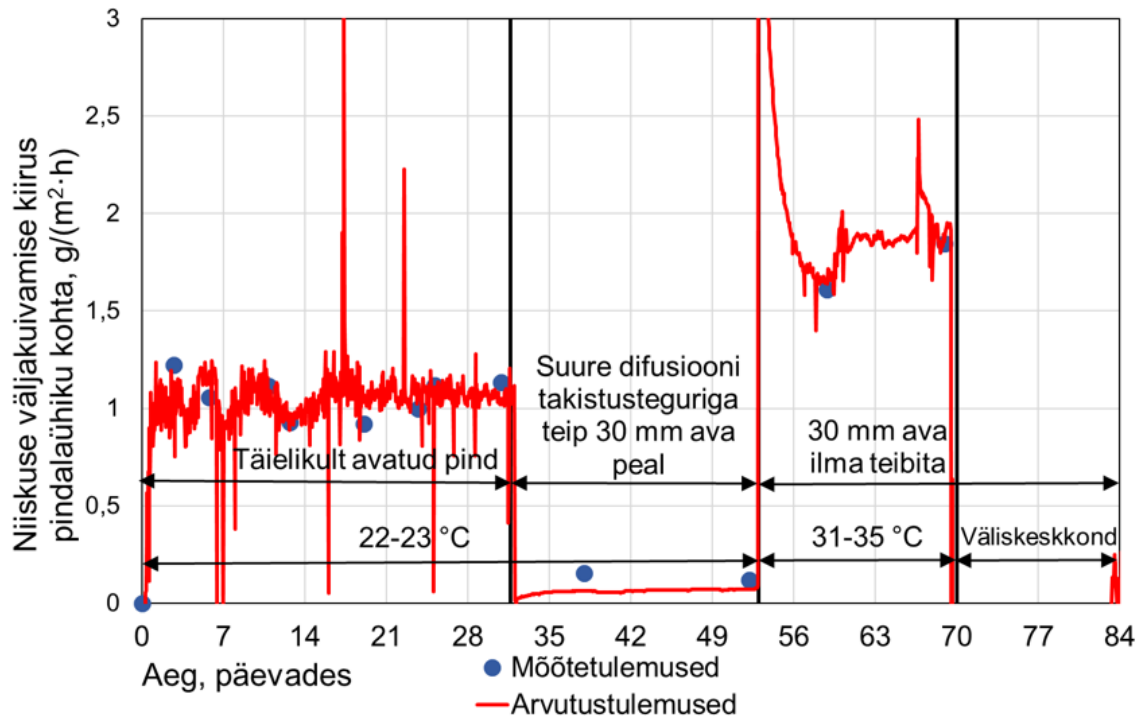
Mõõteandurite suhtelise niiskuse mõõtetäpsus on vahemikus $\pm 2,5\text{...}3,5\%$ ning üle 90% suhtelise niiskuse taseme korral $\pm 5\%$. Seda arvestades saab arvutusmudeli täpsust hinnata heaks, kuna keskmine erinevus suhtelise niiskuse tasemel $RH < 90\%$ andurite juures on $\pm 3,5\%$ ja suhtelise niiskuse tasemel $RH > 90\%$ $\pm 6,5\%$, kus arvutustulemuste täpsust võib mõjutada ka modelleerimise mõningane ebatäpsus.



Joonis 3.18 Katsekeha 2 katselised ja arvutuslikud suhtelised niiskused

Nii katsekeha katseliste kui arvutuslike niiskuse väljakuivamise voogude tulemuste graafikud on toodud joonisel 3.19. Jooniselt on näha, et arvutuslikud ja mõõdetud tulemused langevad kokku üsna täpselt. Katse mõõtetulemused on võrdsed või kõiguvad pisut arvutusmudelis saadud tulemuste ümber. Mõõtetulemuste kõikumisi kajastab arvutusmudel arvutustulemustes sarnaselt. Kuigi arvutusmudeli tulemuste kohaselt suure difusiooni takistusteguriga teibiga kaetud ava olukorras katsekehast veeauru praktiliselt välja ei kuivanud, on näha, et 38. päeval esineb niiskuse väljakuivamise osas kolmekordne mõõtetulemuste erinevus arvutustulemustega võrreldes. Selle põhjuseks võib olla, et katsekehade kaalumisel võib olla

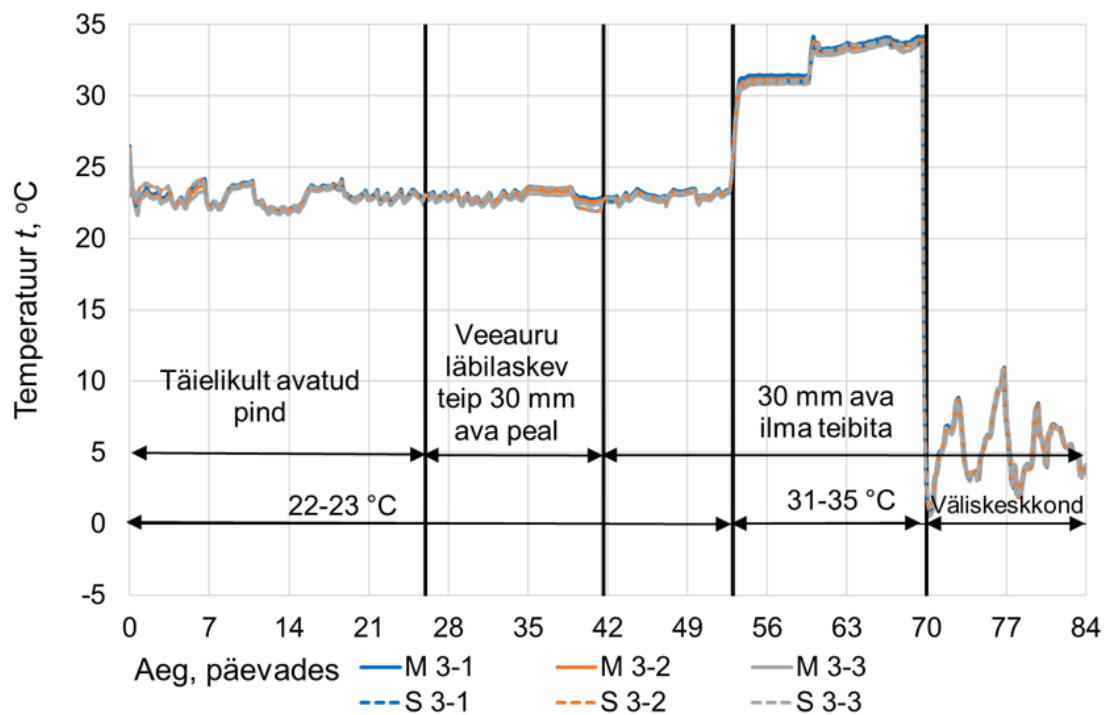
mõõtmisviga, samas võib olla põhjuseks ka lekete olemasolu katsekehas ja seetõttu on arvutusmodeli tulemused katsetulemustega võrreldes kaks kuni kolm korda väiksemad. Väga äkilised tõusud arvutusmodeli graafikus annavad mõista, et katsetappe muutes on katsekehast vabanenud suures koguses niiskust, mis on iseloomulik ääretingimuste järsule muutumisele.



Joonis 3.19 Katsekeha 2 katselised ja arvutuslikud niiskuse väljakuivase voo tulemused

3.3.3 Katsekeha 3 mõõtetulemuste võrdlus arvutustulemustega

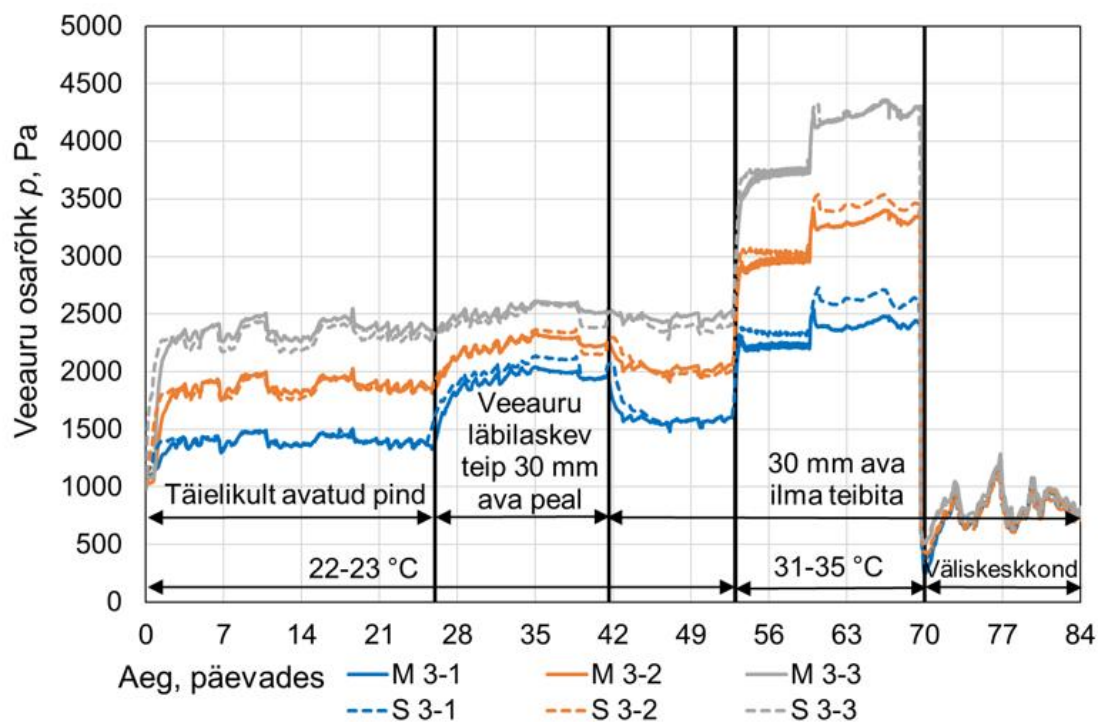
Katsekeha 3 arvutuslikud ja katselised temperatuurigraafikud erinevatel kõrgustel on toodud joonisel 3.20. Arvutuslike ja katseliste tulemuste erinevus on marginaalne. Katses esinenud temperatuurikõikumised kajastusid ka arvutusmodeli tulemustes. Katsekeha 3 temperatuuri arvutuslikud arvutustulemused järgivad üsna täpselt katse kulgu, kuna katseliste ja arvutuslike tulemuste erinevused on väga väikesed.



Joonis 3.20 Katsekeha 3 katselised ja arvutuslikud temperatuurid

Veeauru osarõhkude arvutuslikud ja katsetulemuste abil arvatud tulemused katseseina 3 erinevatel kõrgustel on näidatud joonisel 3.21. Täielikult avatud pinna puhul (joonisel päevad 0-26) oli arvustulemuste ja katsetulemuste keskmine erinevus 30 Pa. Olukorras, kus katsekehal olevat 30 mm laiust ava kattis veeauru läbilaskev teip, oli mudeli arvustulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes 40 Pa. Teibita ava katsetapi arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katses saadud tulemuste suhtes oli temperatuuri 22 °C kuni 23 °C juures 40 Pa. Kõige suurem arvutuslike ja katsetulemuste erinevus oli 100 Pa. See oli 53. – 70. päeva vahel teibita ava olukorras temperatuuril 31°C kuni 35 °C. Väliskeskonna arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katseliste tulemustega võrreldes oli 20 Pa.

Võrreldes temperatuurigraafikuga (vt joonis 3.20), erinevad veeauru osarõhu graafikul arvutuslikud tulemused pisut katselistest tulemustest. Temperatuurigraafikul esinenud väiksemad erinevused arvutuslikes ja katselistes tulemustes esinevad ka veeauru osarõhu graafikul. Seda seetõttu, et veeauru osarõhu väärtus on otseses sõltuvuses temperatuurist ja suhtelisest niiskusest. On mõistetav, et osarõhkude tulemuste erinevused on kohtades, kus oli ka suuremad arvutuslikud ja katselised temperatuuri erinevused.

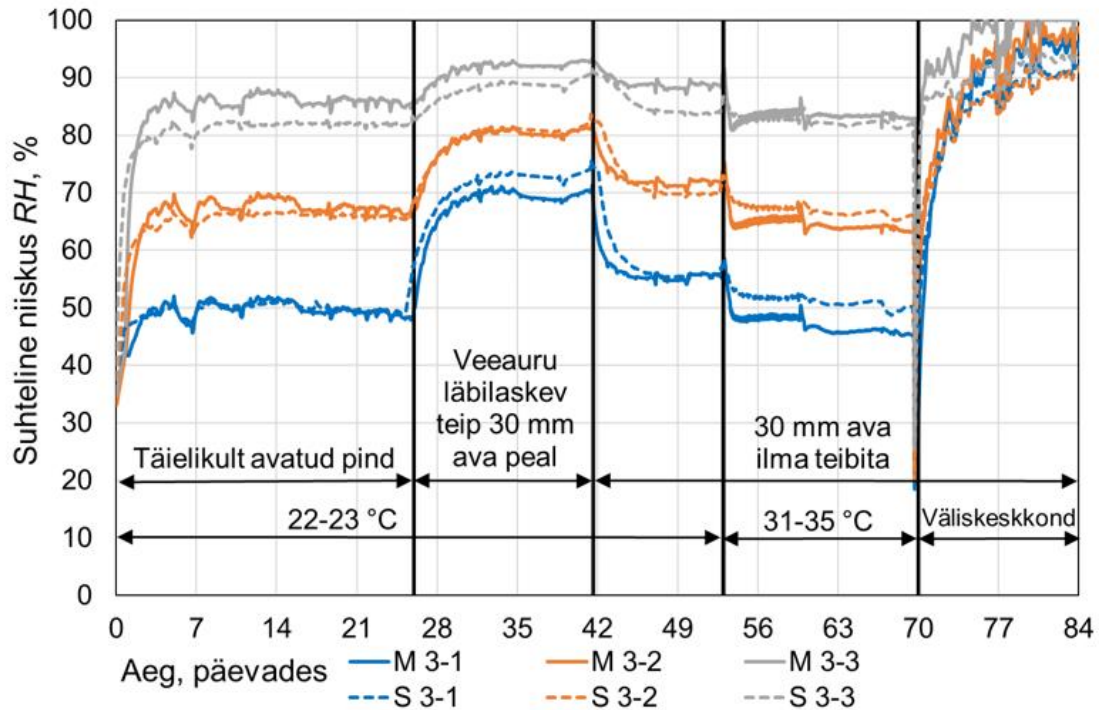


Joonis 3.21 Katsekeha 3 katselised ja arvutuslikud veeauru osarõhud

Kolmanda katsekeha arvutuslikud ja katselised suhtelise niiskuse graafikud katsekeha erinevatel kõrgustel on toodud joonisel 3.22. Täielikult avatud pinna puhul (joonisel päevad 0-26) oli arvutustulemuste ja katsetulemuste keskmine erinevus 3%. Olukorras, kus katsekehal olevat 30 mm laiust ava kattis veeauru läbilaskev teip, oli arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmine erinevus 3%. Mudeli arvutustulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes oli 7%. Teibita ava katsetapi arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katses saadud tulemuste suhtes oli 5%. Kõige suurem arvutusliku ja katsetulemuste erinevus oli 70. – 84. päeva vahel väliskeskkonnas, kus keskmine erinevus oli 6%.

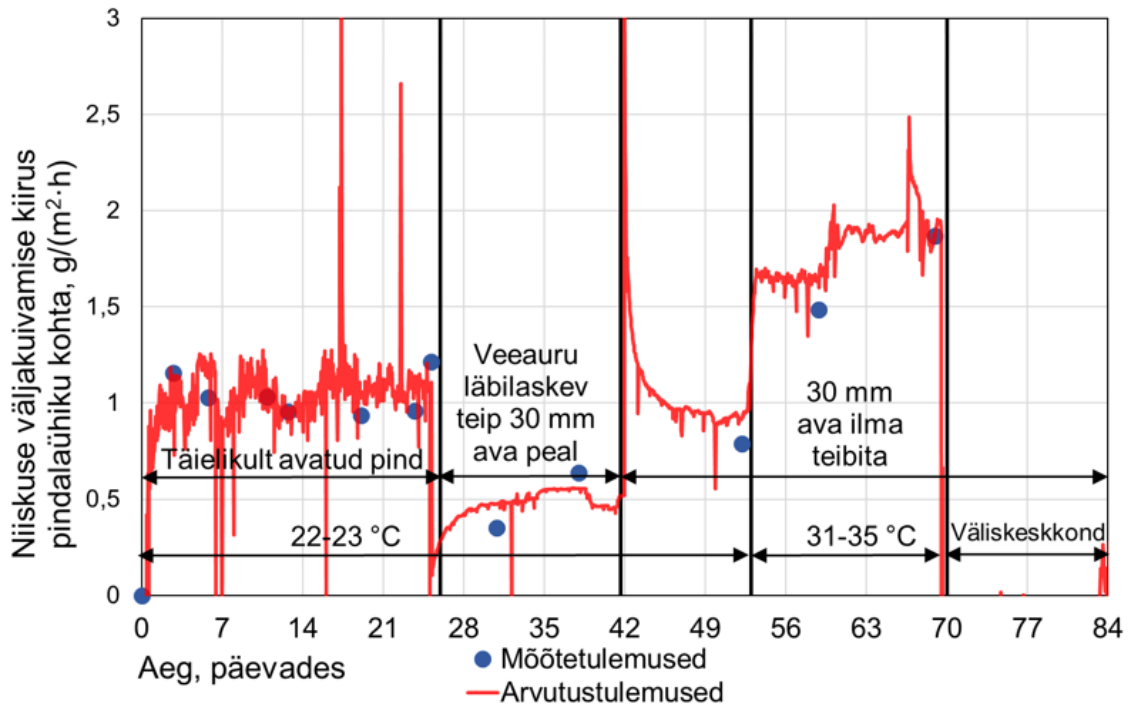
Jooniselt 3.22 on näha, et suured arvutuslike ja katseliste graafikute tulemuste erinevused on ajavahemikus 28 - 84 päeva. Suured erinevused on andurite 3-1 ja 3-3 asukohtade juures (erinevus vahemikus 6% kuni 8%). Nendes asukohtades on arvutustarkvara Delphin hinnanud suhtelise niiskuse oluliselt madalamaks või kõrgemaks kui on registreeritud katse käigus. Põhjuseks võivad olla asjaolud, et katsekehades olid lekked või katsekehade kaalumistel esines mõõtmisviga. Kasutades mudelis madalamat difusioonitakistustegurit ei tõuse arvutusmudeli tulemused nii kõrgele tasemele kui tegelikkuses. Väike erinevus kogu katse vältel arvutuslike ja katseliste tulemuste vahel võib olla tingitud isolatsioonimaterjali omaduse erinevusest. Samuti võib erinevus olla põhjustatud anduri mõõtetäpsusest.

Mõõteandurite suhtelise niiskuse mõõtetäpsus on vahemikus $\pm 2,5\text{...}3,5\%$ ning üle 90% suhtelise niiskuse taseme korral $\pm 5\%$. Seda arvestades saab arvutusmodeli täpsust hinnata heaks, kuna keskmine erinevus suhtelise niiskuse tasemel $RH < 90\%$ andurite juures on $\pm 3\%$ ja suhtelise niiskuse tasemel $RH > 90\%$ on täpsus $\pm 6\%$.



Joonis 3.22 Katsekeha 3 katselised ja arvutuslikud suhtelised niiskused

Nii katsekeha katseliste kui arvutuslike niiskuse väljakuivamise voogude tulemuste graafikud on toodud alloleval joonisel 3.23. Jooniselt on näha, et arvutuslike ja katseliste tulemuste kokkulangevus on üsna hea. Katse mõõtetulemused on võrdsed või kõiguvad pisut arvutusmudelis saadud tulemuste ümber. Mõõtetulemuste kõikumised kajastuvad arvutusmodeli arvutustulemustes sarnaselt. Kuigi arvutusmodeli tulemuste kohaselt veeauru läbilaskva teibiga katselõigu osas kuivas niiskus suhteliselt ühtlase kiirusega välja, on näha, et 31. ja 38. päeval ei kattu mõõtetulemused arvutustulemustega. Selle mõõtmistulemuse võib lugeda arvestatavaks, kuna nende mõlema hälve on sarnane. Ka teibita olukorras 52. ja 59. päeval võib lugeda mõõtetulemused õigeks, sest hälbed arvutustulemusest on sarnase suurusega. 42. päeval niiskuse väljakuivamise voo väga äkiline tõus arvutusmodeli graafikus annab mõista, et katselõigu muutudes on katsekehast vabanenud suures koguses niiskust.



Joonis 3.23 Katsekeha 3 katselised ja arvutuslikud niiskuse väljakuivase voo tulemused

3.3.4 Katsekehade mõõtetulemuste omavaheline võrdlus

Katsekeha 1 kaeti alguses täielikult bituumenlindiga hindamaks katsekehas veeauru stabiliseerumist ja küllastumist. Esimeses etapis tõusis katsekeha 1 suhteline niiskus kogu paneelis 100% peale. Katsekehades 2 ja 3, kus jäeti esialgu katsekehad pealt täielikult avatuks hindamaks katsekehast niiskuse väljakuivamise potentsiaali ja kiirust, jäi suhteline niiskus esimeses etapis vahemikku 50...90%. Veeanumale lähima anduri juures stabiliseerus suhteline niiskus mõlemal katsekehal 90% juures. Kui katsekehalt 1 26. päeval bituumenlint eemaldati ja veeauru läbilaskvat teipi 30 mm laiuse ava peal katsetati, langes suhtelise niiskuse tase paneelis vahemikku 76...98%. Katsekehas 1 stabiliseerus veeauru läbilaskva teibiga avale lähima anduri asukohas suhteline niiskus tasemele 76% ja kõige madalamal 96%-ni. Katsekeha 3 puhul, kus täielikult avatud pinnalt katse teises etapis samuti veeauru läbilaskvat teipi 30 mm ava peal katsetati, tõusis suhtelise niiskuse tase vahemikku 70...92%. Veeauru läbilaskva teibiga stabiliseerus kõige kõrgemal asetseva anduri asukohas suhteline niiskus tasemele 70% ja kõige madalamal 92%-ni. Samades tingimustes on katsekeha 1 ja 3 katsetulemuste erinevus 6%. Põhjuseks, miks suhtelise niiskuse tase kahe katsekeha vahel varieerub, võib olla esiteks mõõteandurite mõõteviga, mis on $\pm 3,5\%$ ning suhtelise niiskuse tasemega üle 90% puhul $\pm 5\%$. Teiseks võib olla,

et katsekeha 1 oli pikemat aega kõrge niiskusega olukorras ning väljakuivamisel mõjutab hüsterees suhtelise niiskuse erinevuse teket. Katsekeha 2 juures hinnati teises tööetapis veeauru tõkestavat teipi, mis tõstis ennustatult suhtelise niiskuse taseme kogu paneelis 95...100% peale. Pärast neid katsetusi eemaldati katsekehadelt erinevatel aegadel teibid avadelt ning hinnati väljakuivamise kiirust katsekehas. Selgelt on näha katsekehas 3, et esialgset täielikult avatud olukorras saavutatud suhtelise niiskuse taset andurite asukohtades 30 mm ava puhul samadel välistingimustel ei saavutatud. See on tingitud hüstereesist. Avatud olukorras saavutati temperatuuril 22-23°C suhtelise niiskuse tase ülemise anduri juures 49%, keskmise anduri piirkonnas 67% ja alumise anduri lähedal 85%, kuid 30 mm laiuse avaga avatud olukorras samal temperatuuril olid suhtelise niiskuse tasemed vastavalt ülemise anduri juures 55%, keskmise anduri läheduses 72% ja alumise anduri piirkonnas 89%. Selline olukord on tingitud hüstereesist. Kui temperatuuri tõsteti, kiirenes ka väljakuivamine ja katsekehas 3 saavutati sama niiskustase, mis esimeses tööetapis täielikult avatud olukorras. Täpselt samasugune olukord tekkis ka katsekehas 1. Katsekehas 2, kus teibita 30 mm ava olukorda toatingimustes tavatemperatuuril ei katsetatudki, saavutas 70. päevaks samasuguse suhtelise niiskuse taseme nagu katsekehadel 1 ja 3.

Kõikide katsekehade puhul tõuseb suhtelise niiskuse tase ja väheneb veeauru osarõhkude vahe kui nad kaetakse pealt bituumenlindiga või veeauru tõkestava teibiga. See on ka loogiline, kuna pidevalt saab paneel niiskust peale ning niiskusel ei ole võimalik välja kuivada, sellisel juhul ühtlustub niiskuse tase terves paneelis. Veeauru läbilaskev teip võimaldab katsekehades niiskusel välja kuivada, kuid veeauru osarõhkude erinevus väheneb kaks korda aeglasemalt täielikult avatud ja teibita 30 mm ava olukorrast. Samuti suureneb veeauru läbilaskva teibi puhul anduri asukohtades suhtelise niiskuse tase 10...20%.

Temperatuuri tõus suurendab veeauru osarõhkude erinevust katsekehades. See tõstab väljakuivamise kiirust, kuna veeauru osarõhkude vaheline potentsiaal on suurem.

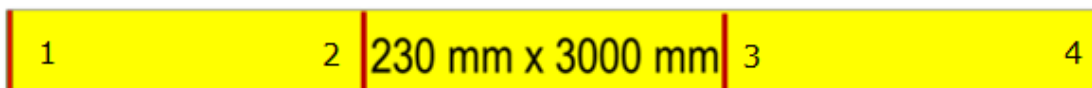
3.4 Ehitusniiskuse väljakuivamine reaalses kliimatingimustes

3.4.1 Sändvitšpaneelis kõige suurema niiskusega koha määramine profiilis

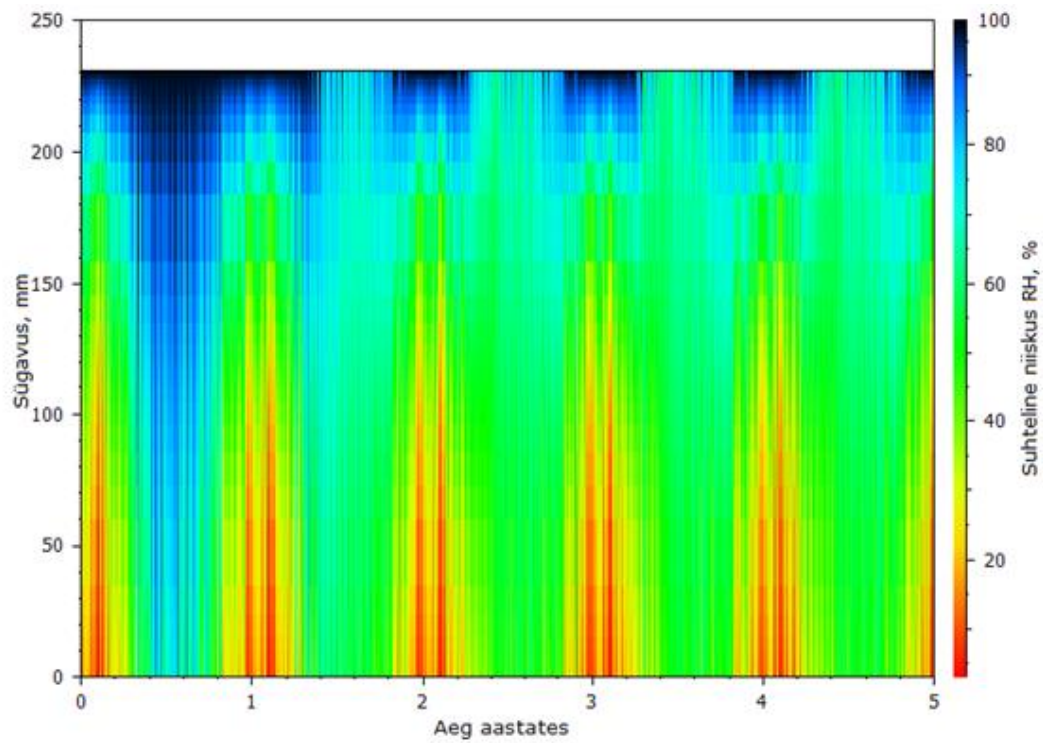
Kivivillaga sändvitšpaneeli elemendi niiskuse väljakuivamise hindamiseks kasutati eelnevalt kalibreeritud arvutusmudelist saadud materjaliomadusi. Arvutused teostati kahe erineva algniiskuse korral. Algniiskusteks määrati $0,132 \text{ kg/m}^3$ ja $0,3 \text{ kg/m}^3$, mis vastavad $6 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 0,23 \text{ m}$ mõõtmetega paneeli puhul veekogustele $0,22 \text{ kg}$ ja $0,5 \text{ kg}$. Päikesekiirguse mõju hindamiseks niiskuse väljakuivamisele tarindist, teostati arvutusmudeli simulatsioonid kolmes päikesekiirguse olukorras: läänepoolse päikesekiirgusega, põhjapoolse päikesekiirgusega ja ilma päikesekiirguseta olukorras. Arvutusmudelisse määrati paneeli pikkuseks 6 meetrit, hindamaks reaalses skaalas olukorda. Suhtelise niiskuse ja temperatuuri arvutused on teostatud ava juurest kuni paneeli keskmesse ühe meetrise sammuga kivivillas kõige suurema niiskusega asukohas välimise teraslehe sisepinnal, kuna arvutusmudeli kalibreerimisel osutus välimise teraslehe sisepinna lähedal olev kiht kõige kriitilisemaks. Paneeli niiskustehnilise toimivuse hindamiseks on hügrokoopse ala ülempiir. Suhtelise niiskuse väärtuse 97% puhul on tegemist kivivilla hügrokoopse ala ülempiiriga, mis tähendab, veeauru muutumist veeks ehk kondenseerumist. Seda piiri ületades on oht vee tekkimisele paneelis.

Kõige kriitilisema koha määramiseks profiilis teostati arvutus paneeli algniiskusega $0,3 \text{ kg/m}^3$ ning päikesekiirgust arvestamata hinnati niiskuse jaotumist paneeli keskel. Kuna niiskuse väljakuivamiseks olev ava on kõige kaugemal, saab hinnata, millises asukohas on suhtelise niiskuse tase kõige kriitilisem ja võtta aluseks väljakuivamise hindamisele. Joonisel on märgitud mustaga hügrokoopse ala ülempiir, mida ületada ei tohi.

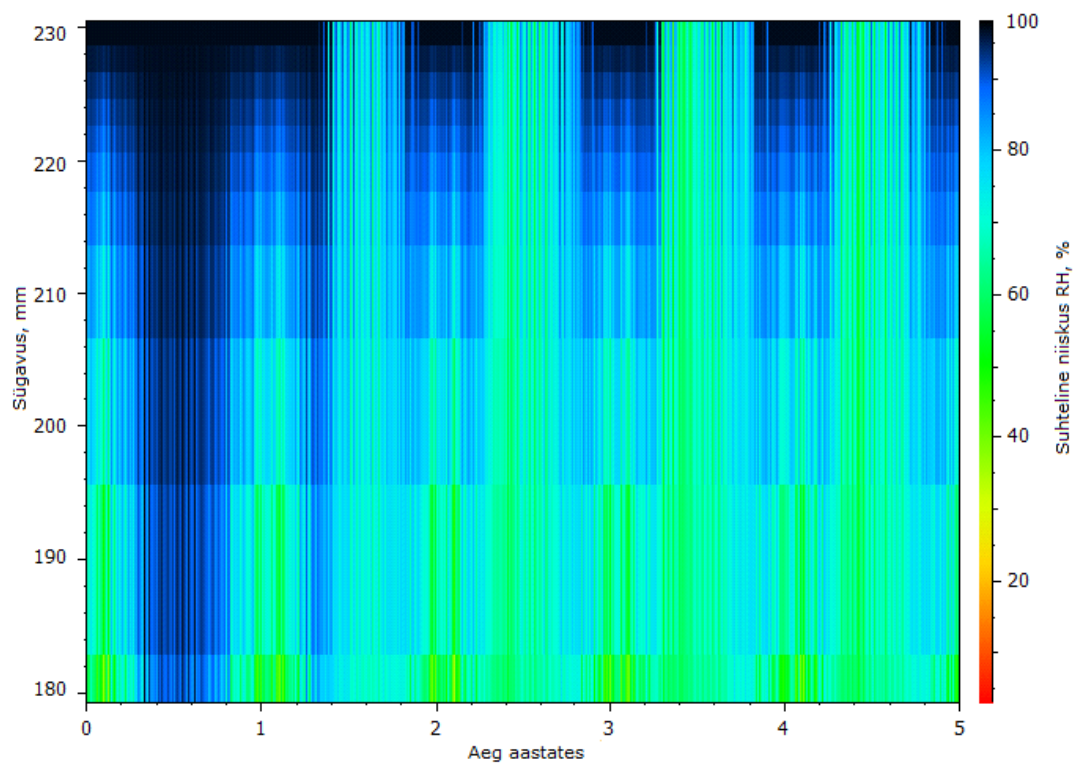
↙ 30 mm ava asukoht



Joonis 3.24 Arvutusmudeli profiil – arvutatud asukohad on markeeritud punasega. 1 – paneelivuugi läheduses, 2 – paneelivuugist ühe meetri kaugusel, 3 – paneelivuugist kahe meetri kaugusel, 4 – paneeli keskel.



Joonis 3.25 Niiskuse jaotumine sändvitšpaneeli keskel (joonisel 15 mm laiusel lõigul algniiskusega $0,3 \text{ kg/m}^3$)

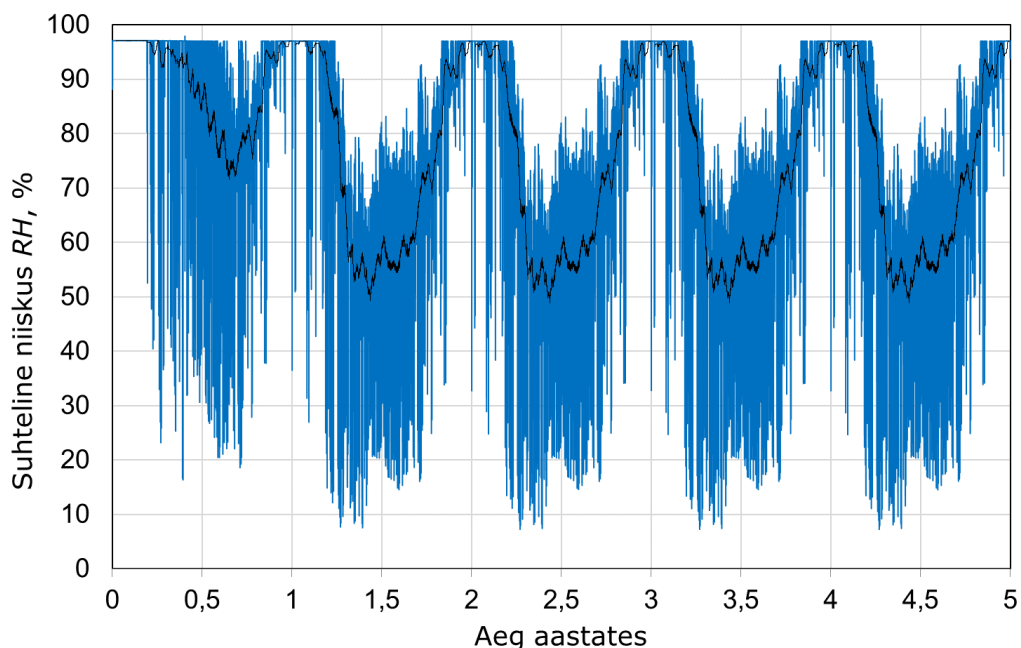


Joonis 3.26 Niiskuse jaotumine välimises 50 mm paksusega kihis

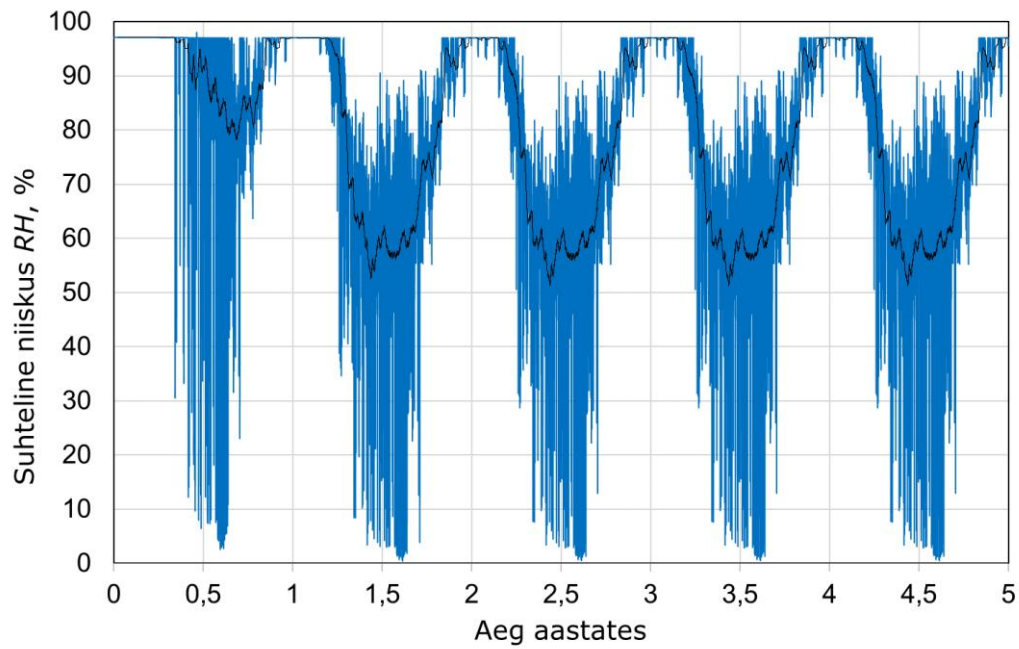
Jooniselt 3.25 on näha, et niiskus jaotub paneelis kihiti. Joonise 3.26 alusel saab väita, et kõrge kondenseerumise tõenäosus esineb väliskeskonna teraslehe siseküljel, kus ületatakse hügrokoopse ala ülempiir.

3.4.2 Ilmakaarte mõju

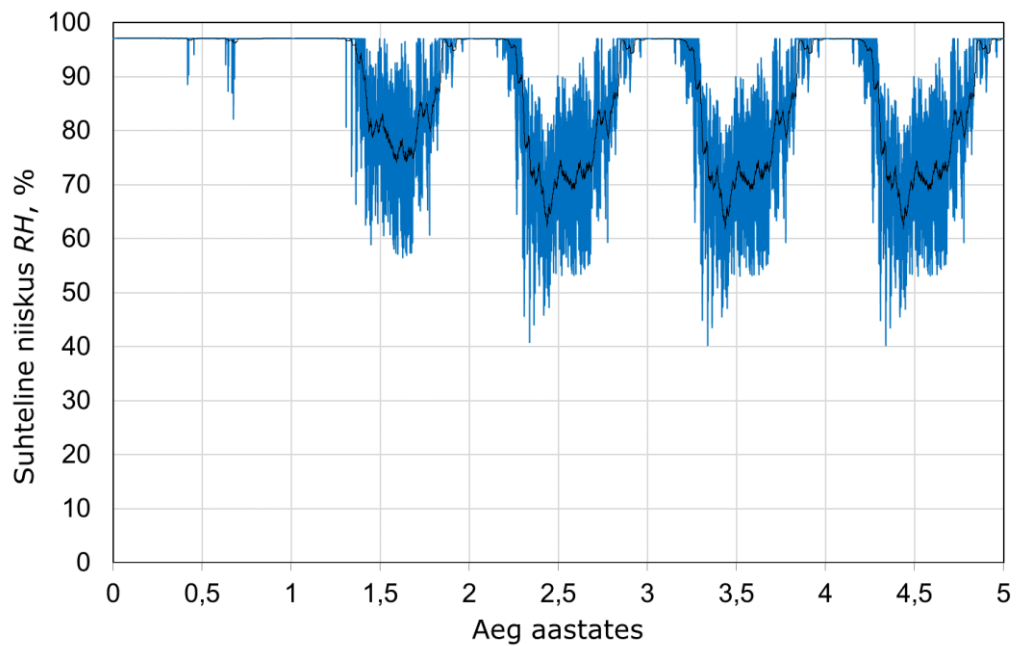
Hindamaks ilmakaarte ja päikesekiirguse mõju, on arvutused teostatud lääne- ja põhjapoolse päikesekiirguse mõjuga. Kõikides arvutustes on paneelide algniiskuseks võetud $0,3 \text{ kg/m}^3$, mis vastab olukorrale, kus kogu paneeli kohta on $0,5 \text{ kg}$ vett. Päikesekiirguse mõju hindamiseks on arvutused teostatud hajusa ja otsese päikesekiirgusega. Võrdluseks on toodud ka päikesekiirguseta olukord. Arvutustulemused on toodud all olevatel joonistel 3.27, 3.28 ja 3.29. Sinise joonega on markeritud tunnise intervalliga suhtelise niiskuse arvutustulemused ning musta joonega on markeritud tunnikeskmete alusel arvutatud pikema perioodi keskmine suhtelise niiskuse tase.



Joonis 3.27 Läänepoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse tase sändvitšpaneeli keskel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga



Joonis 3.28 Põhjapoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse tase sändvitšpaneeli keskel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga



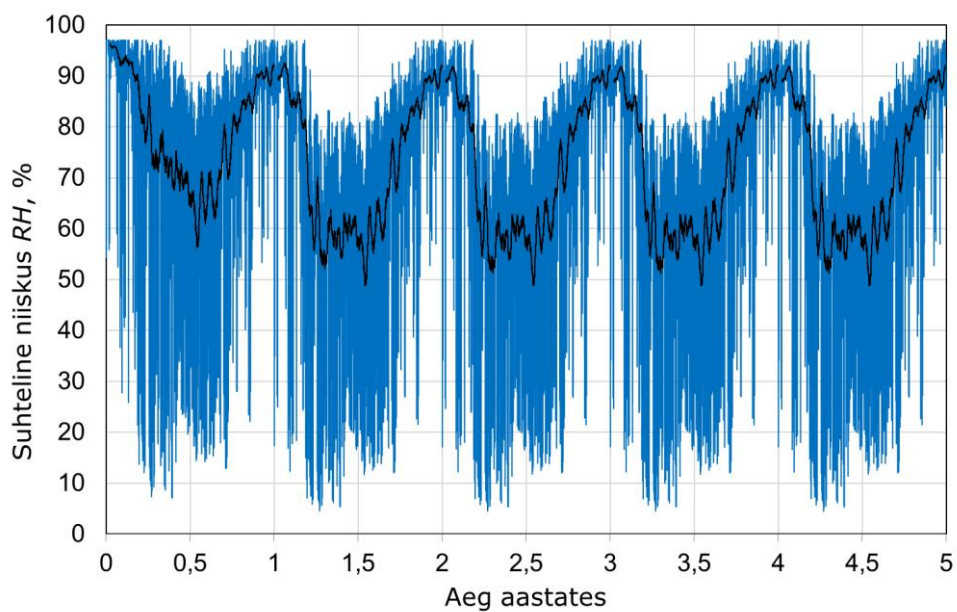
Joonis 3.29 Päikesekiirguseta suhtelise niiskuse tase sändvitšpaneeli keskel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga

Arvutustulemustes selgub, et kõige kriitilisem aeg on talv, kus valdavalt on suhtelise niiskuse tase üle 97%, temperatuur alla 0 °C ning toimub jäätumine. Ilmakaarte osas on näha, et läänepoolse ja põhjapoolse päikesekiirguse korral langeb suhtelise niiskuse tase kohe esimesel aastal, kuid päikesekiirguseta olukorras on suhteline niiskus esimesel aastal stabiilselt kõrge - üle 97%. Päikesekiirgus avaldab suurimat mõju suvekuudel, mil päikesekiirgus on intensiivsem ja pikaajalisem. Talvel tõuseb suhtelise niiskuse tase paneelis ja päikesekiirguse mõju on pea olematu. Ootuste kohaselt on suhtelise niiskuse tase kõrgeim ilma päikesekiirguseta arvatud olukorras.

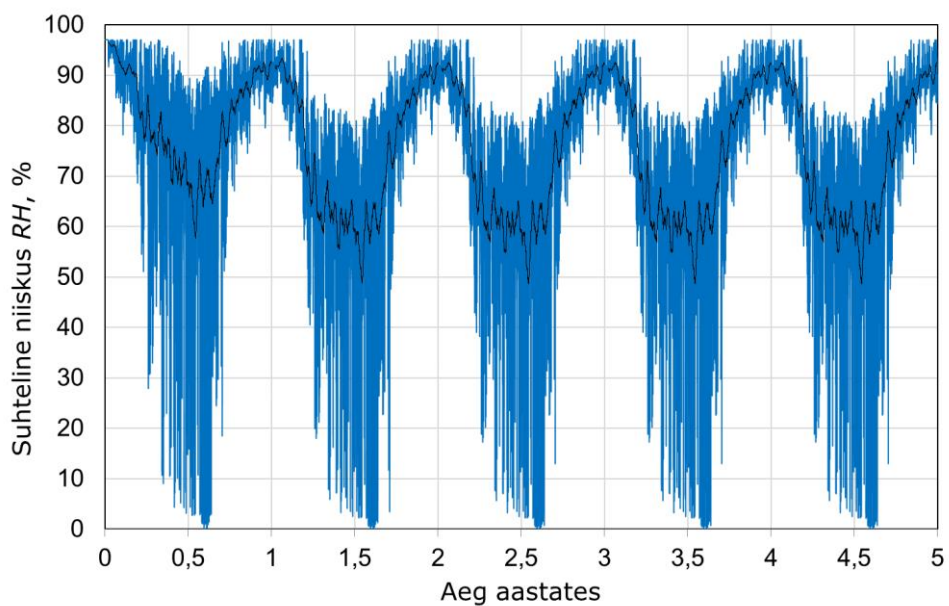
3.4.3 Erinevate mõõtepunktide asukoha mõju sändvitšpaneelis

Hindamaks niiskuse väljakuivamist paneelivuugist erinevatel kaugustel, on võrdluseks arvatud ka paneeli keskelt avale lähenedes meetrise sammuga suhtelise niiskuse tase. Kasutatud on arvutusolukordasid, kus paneelide algniiskuseks on 0,3 kg/m³ ning nii ilma päikesekiirguse mõjuta kui ka põhja-ja läänepoolse päikesekiirguse mõju olukordades. Allolevatel joonistel on esitatud paneelivuugi läheduses olukord (vt joonis 3.30, 3.31 ja 3.32) paneelivuugist ühe meetri kaugusel olukord (vt joonis 3.33, 3.34 ja 3.35) ja paneelivuugist kahe meetri kaugel olukord (vt joonis 3.36, 3.37 ja 3.38) Sinise joonega on markeeritud tunnise intervalliga suhtelise niiskuse arvutustulemused ning musta joonega markeeritud tunnise intervalliga suhtelise niiskuse trendjoon.

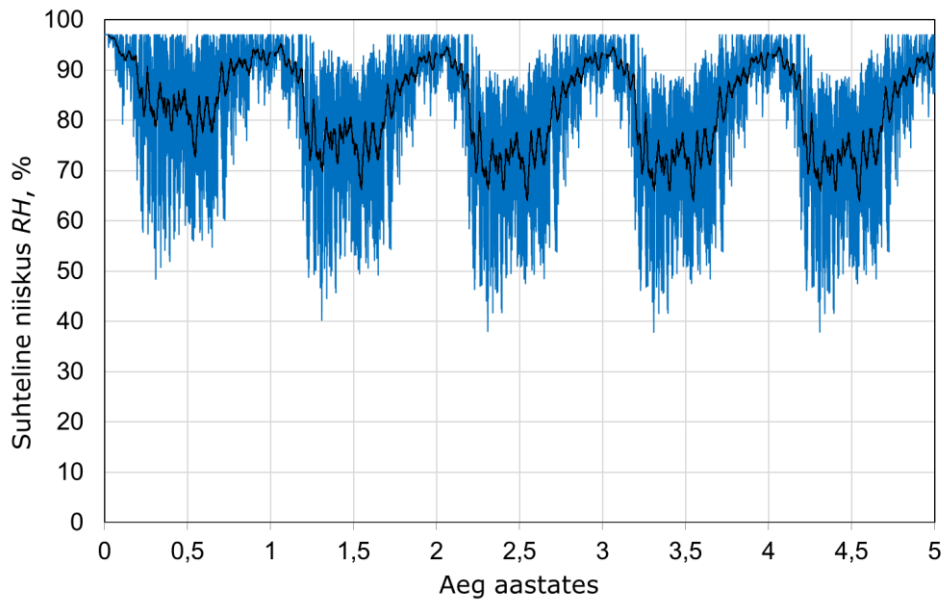
Paneelivuugi läheduses



Joonis 3.30 Läänepoolse päikese kiirgusega suhtelise niiskuse tase paneelivuugi läheduses välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga

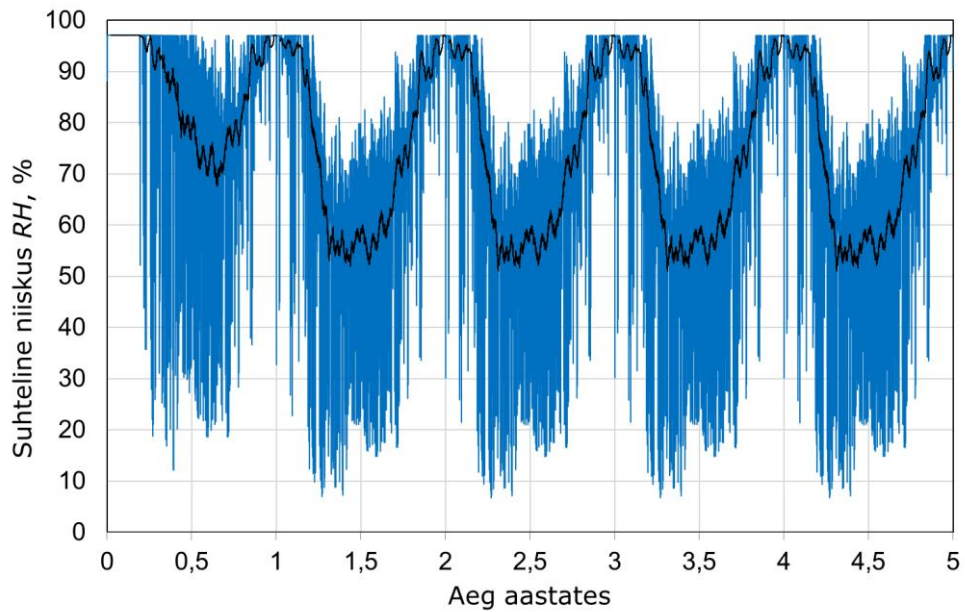


Joonis 3.31 Põhjapoolse päikese kiirgusega suhtelise niiskuse tase paneelivuugi läheduses välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga.

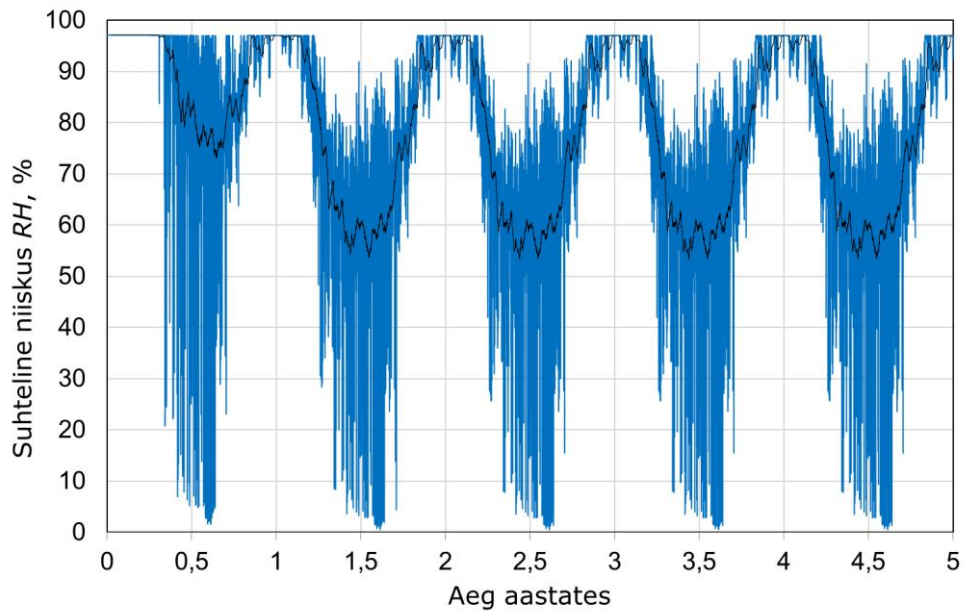


Joonis 3.32 Päikesekiirguseta suhtelise niiskuse tase paneelivuugi läheduses välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga

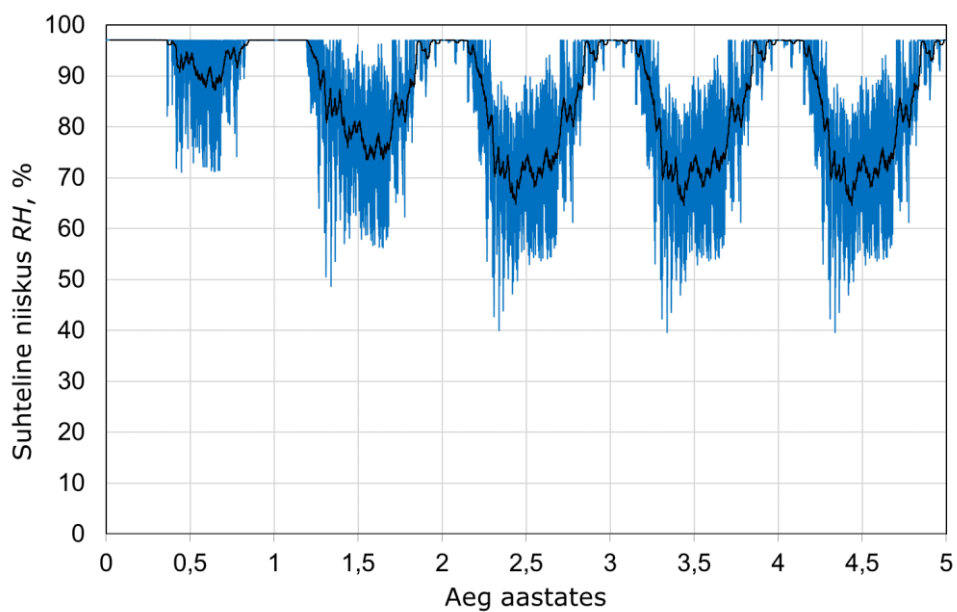
Paneelivuugist ühe meetri kaugusel



Joonis 3.33 Läänepoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse tase paneelivuugist ühe meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinnal– arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga.

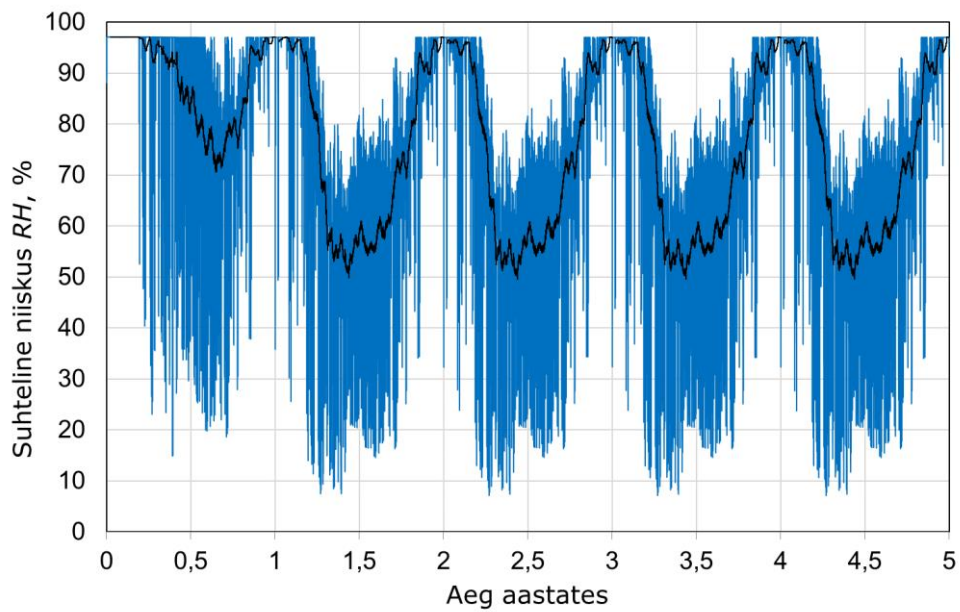


Joonis 3.34 Põhjapoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse tase paneelivuugist ühe meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga

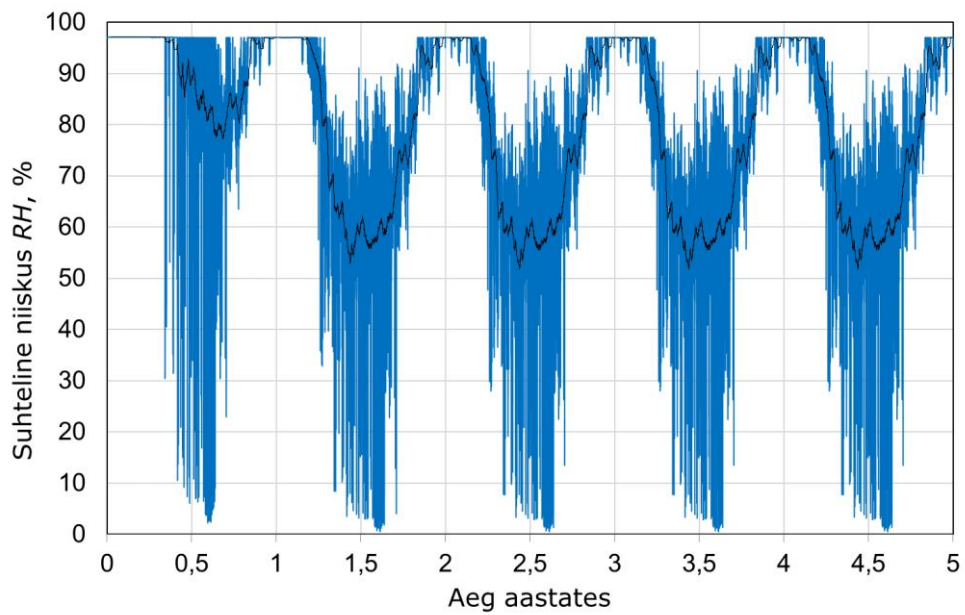


Joonis 3.35 Päikesekiirgusega suhtelise niiskuse tase paneelivuugist ühe meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga

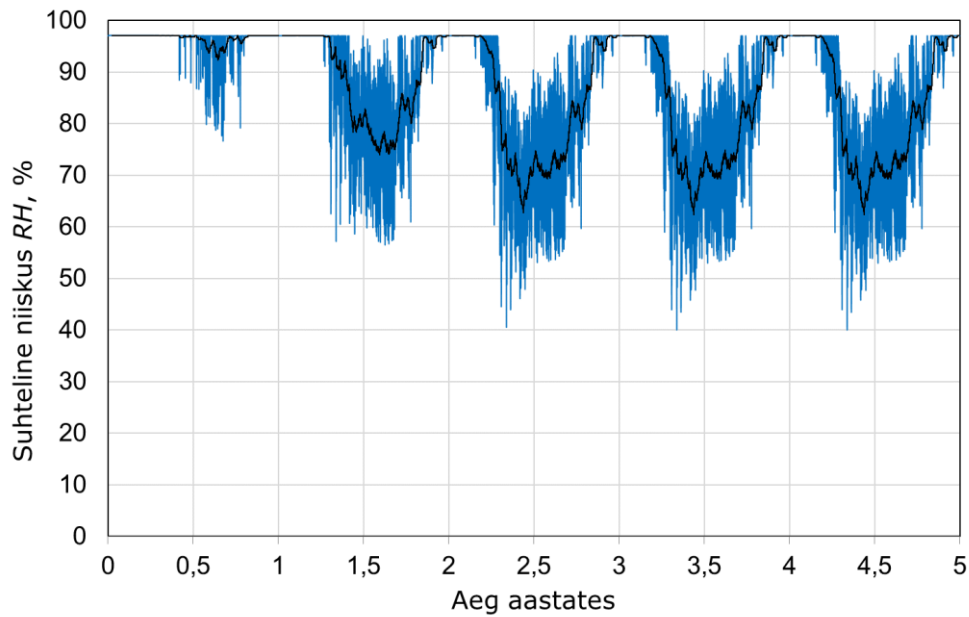
Paneelivuugist kahe meetri kaugusel



Joonis 3.36 Läänepoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse tase paneelivuugi kahe meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga



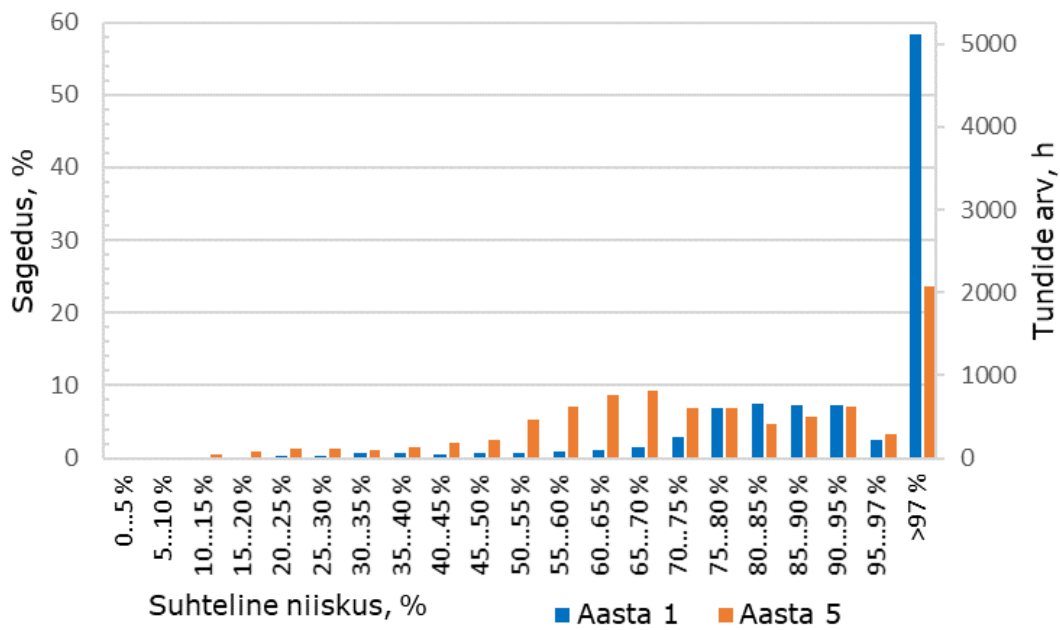
Joonis 3.37 Põhjapoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse tase paneelivuugist kahe meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav pikema perioodi keskmine mustaga



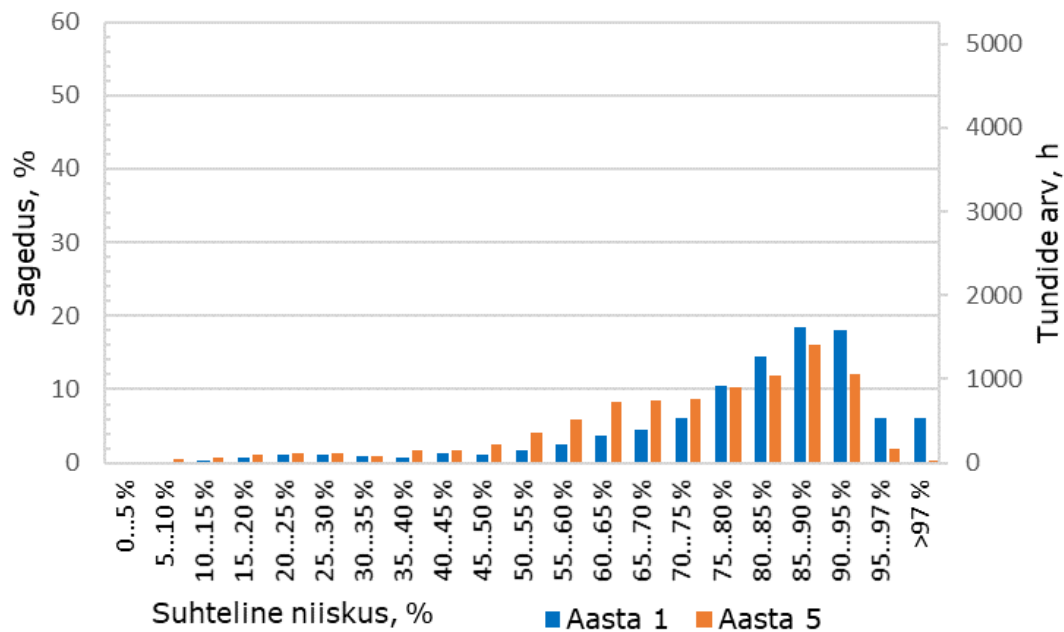
Joonis 3.38 Päikesekiirguseta suhtelise niiskuse tase paneelivuugist kahe meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nendele vastav pikema perioodi keskmine mustaga

Ootuspäraselt on arvutustulemustes näha, et paneelivuugile lähenedes langeb kiiremini ka suhtelise niiskuse tase. On näha, et päikesekiirgusega olukordades toimub peamine kuivamine esimese aasta jooksul, kuid päikesekiirguseta olukorras esimese kahe aasta jooksul. Kõikides asukohtades paneelis on kriitiline ajaperiood talv, mil paneeli välimise teraslehe juures on üle 97% suhtelise niiskuse tase kõige sagedamini.

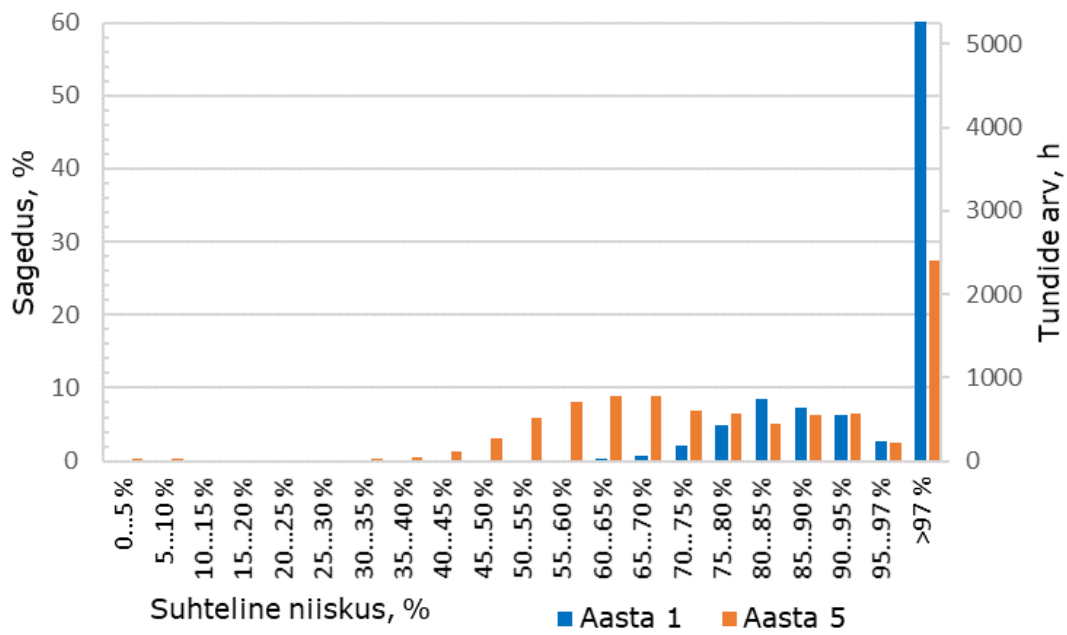
Joonistel 3.39 - 3.44 on toodud läänepoolse ja põhjapoolse päikesekiirgusega ning ka päikesekiirguseta olukordades suhtelise niiskuse tasemete sagedusjaotus tunnikeskmiste alusel paneeli keskel ja paneelivuugi läheduses.



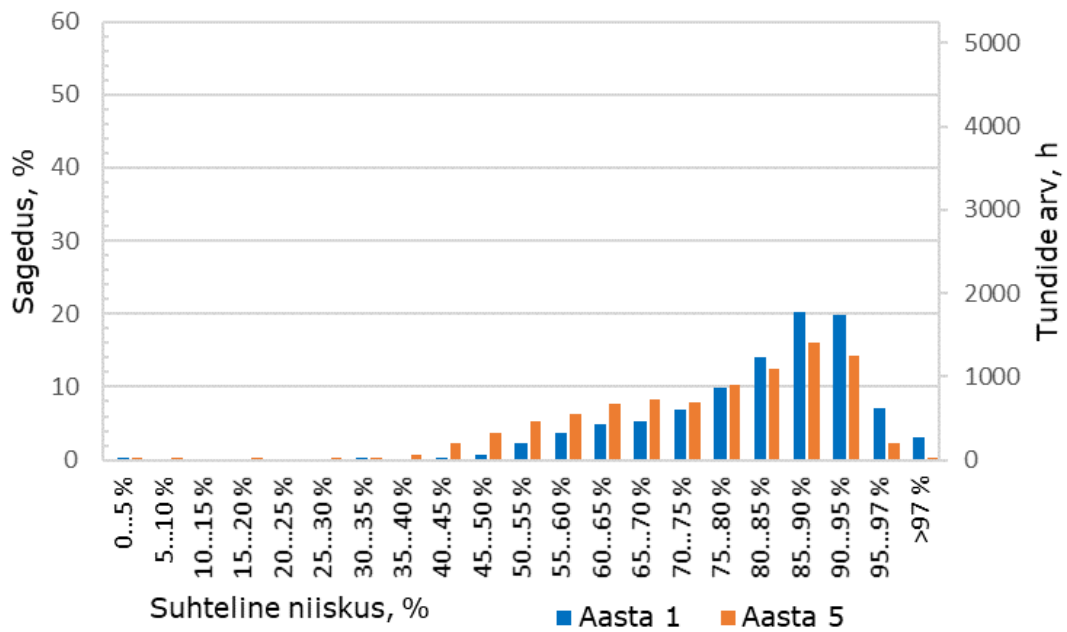
Joonis 3.39 Läänepoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse sagedusgraafik paneeli keskel välimise teraslehe sisepinnal



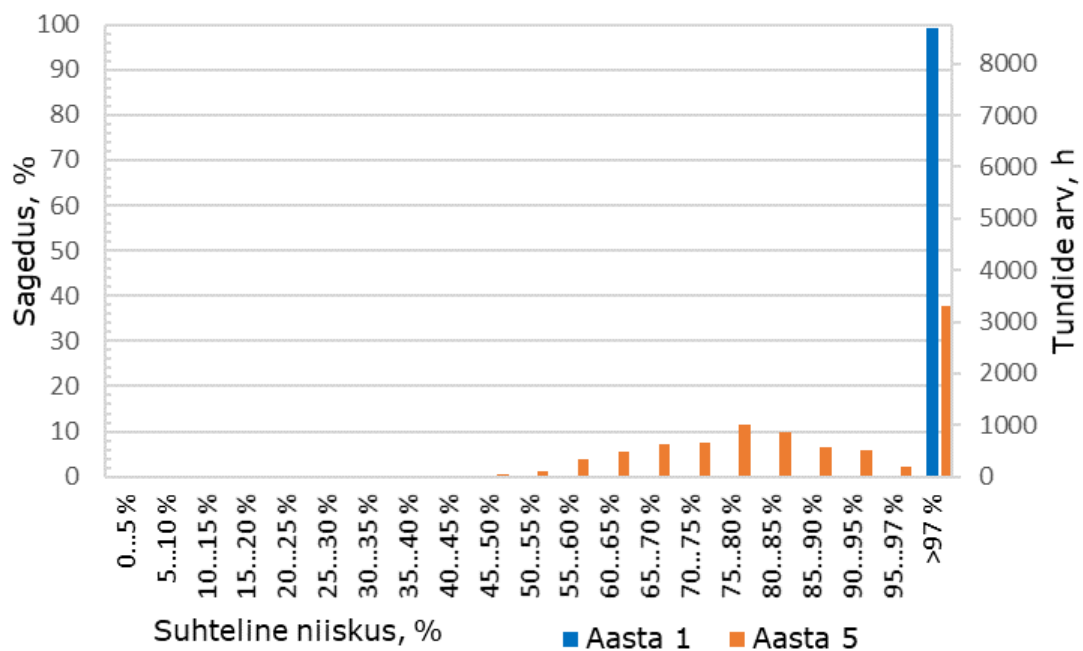
Joonis 3.40 Läänepoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse sagedusgraafik paneelivuugi juures välimise teraslehe sisepinnal



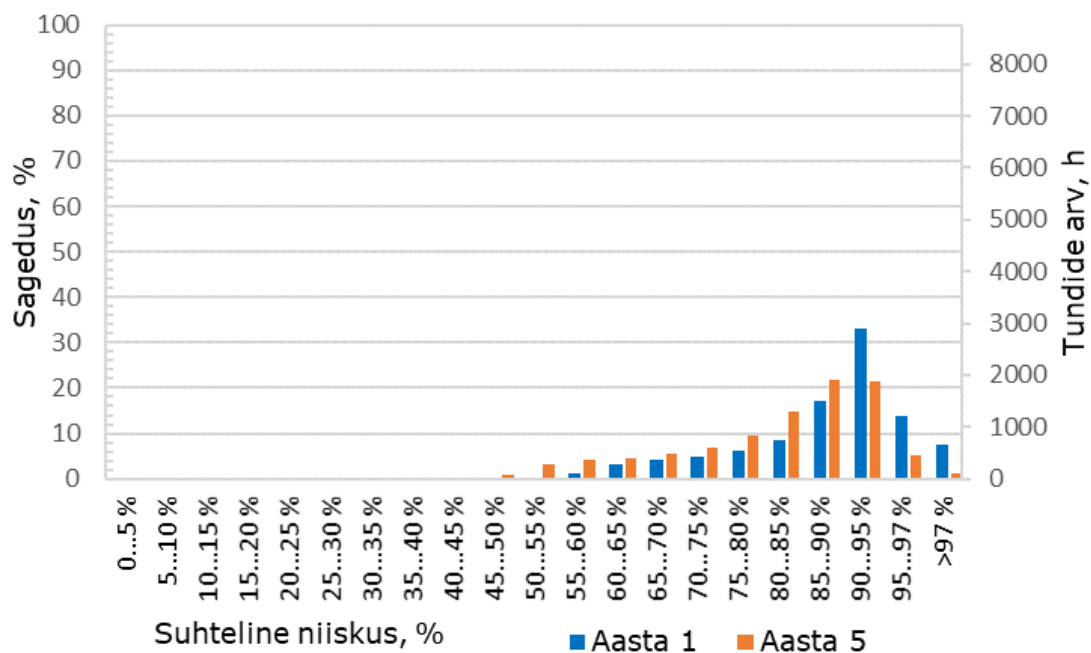
Joonis 3.41 Põhjapoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse sagedusgraafik paneeli keskel välimise teraslehe sisepinnal



Joonis 3.42 Põhjapoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse sagedusgraafik paneelivuugi juures välimise teraslehe sisepinnal



Joonis 3.43 Päikesekiirguseta suhtelise niiskuse tase sändvitšpaneeli keskel välimise teraslehe sisepinnal



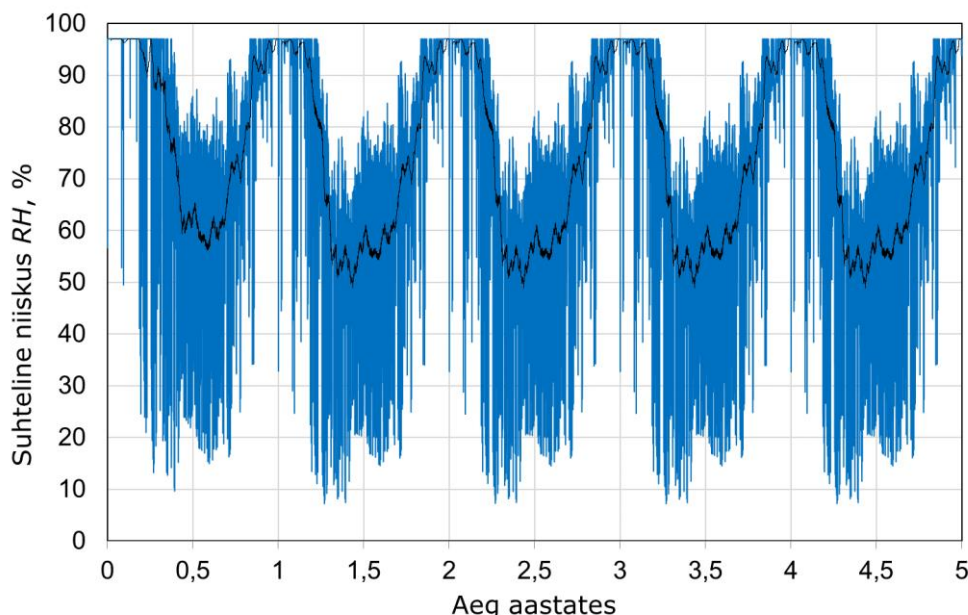
Joonis 3.44 Päikesekiirguseta suhtelise niiskuse tase paneeli vuugi juures välimise teraslehe sisepinnal

Selgelt võib näha, et päikesekiirguse mõjul välimise lehe sisepinnal paneelivuugist kolme meetri kaugusel niiskus nii hästi välja ei kuiva kui paneelivuugi lähedusest.

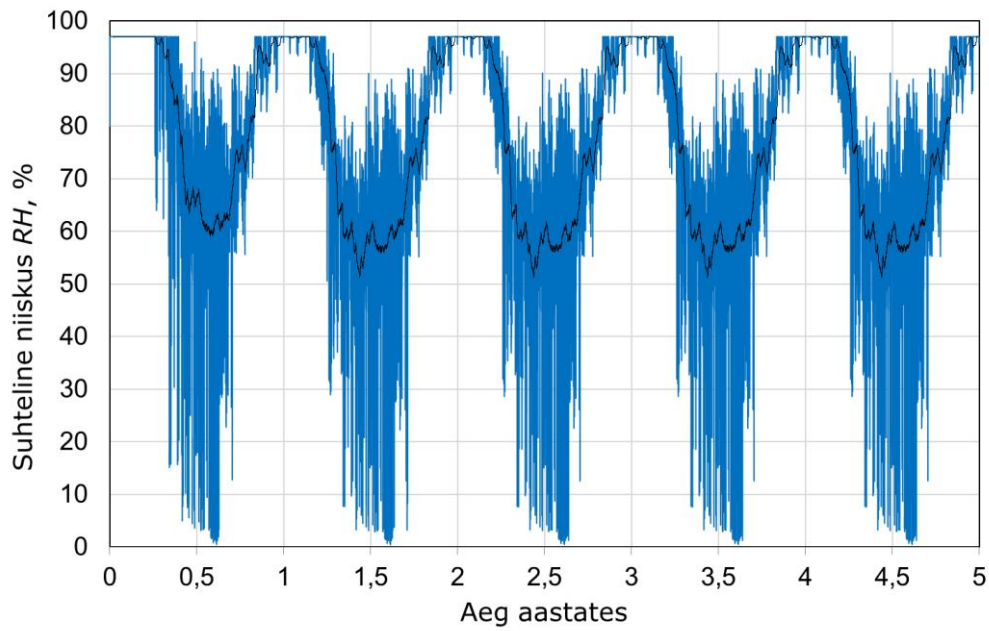
Viienda aasta lõpuks on hügrokoopse ala ülempiiri ületamise sagedus läänepoolse päikesekiirgusega olukorras paneelivuugist kolme meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinna kihis 24% ja samas kihis paneelivuugi läheduses vaid 0,2%. Põhjapoolse päikesekiirgusega olukorras ületatakse viiendal aastal hügrokoopse ala ülempiiri välimise teraslehe juures paneelivuugist kolme meetri kaugusel 28% ja paneelivuugi läheduses vaid 0,3%. Päikesekiirguseta olukorras ületatakse viiendal aastal hügrokoopse ala ülempiiri välimise teraslehe juures paneelivuugist kolme meetri kaugusel 38% ja paneelivuugi läheduses vaid 1%.

3.4.4 Algniiskuse mõju

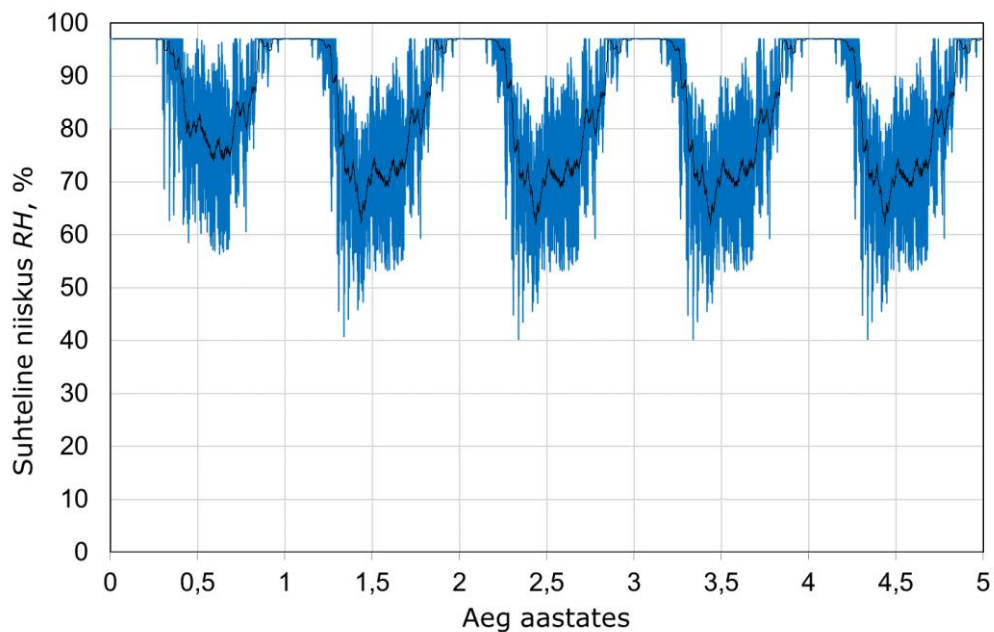
Hindamaks kuidas paneeli algniiskuse hulk mõjutab niiskuse väljakuivamise kiirust ja kestust on teostatud arvutused ka madalama algniiskuse juures, milleks on $0,132 \text{ kg/m}^3$. Kuna eelnevates arvutustes on paneelivuugist kolme meetri kaugusel välimise teraslehe sisepinna kihis olnud kõige kriitilisem olukord, siis on teostatud väiksema algniiskusega arvutus selles punktis. Väiksema algniiskusega olukorras on uuritud ka lääne- ja põhjapoolse päikesekiirguste mõju väljakuivamisele. All olevatel joonistel (vt joonis 3.45, 3.46 ja 3.47) on toodud madalama algniiskusega olukorras suhtelise niiskuse graafikud.



Joonis 3.45 Läänepoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskus paneeli keskel madalama algniiskusega välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nende vastav trendjoon mustaga



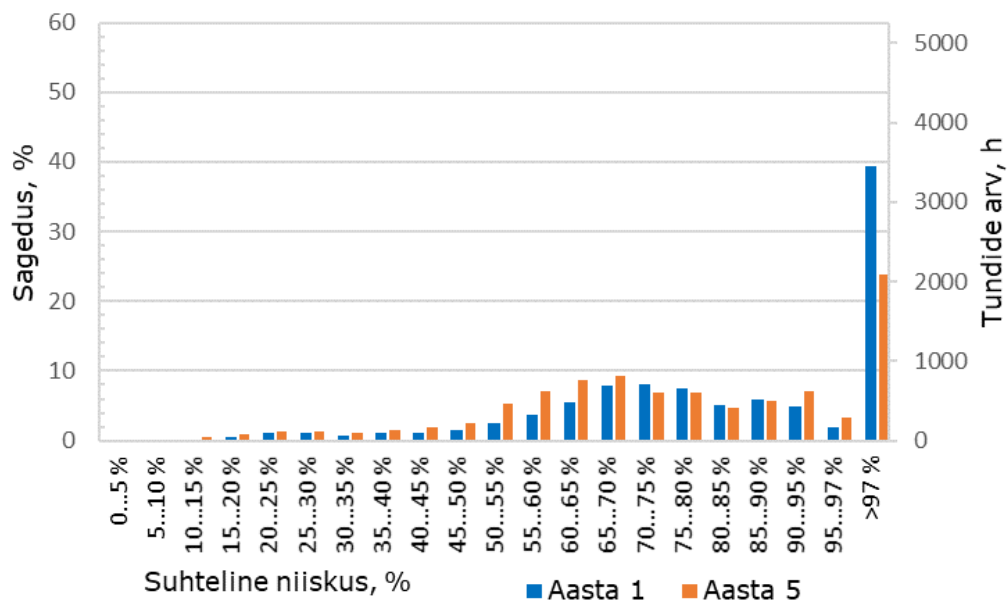
Joonis 3.46 Põhjapoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskus paneeli keskel madalama algniiskusega välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nendele vastav trendjoon mustaga



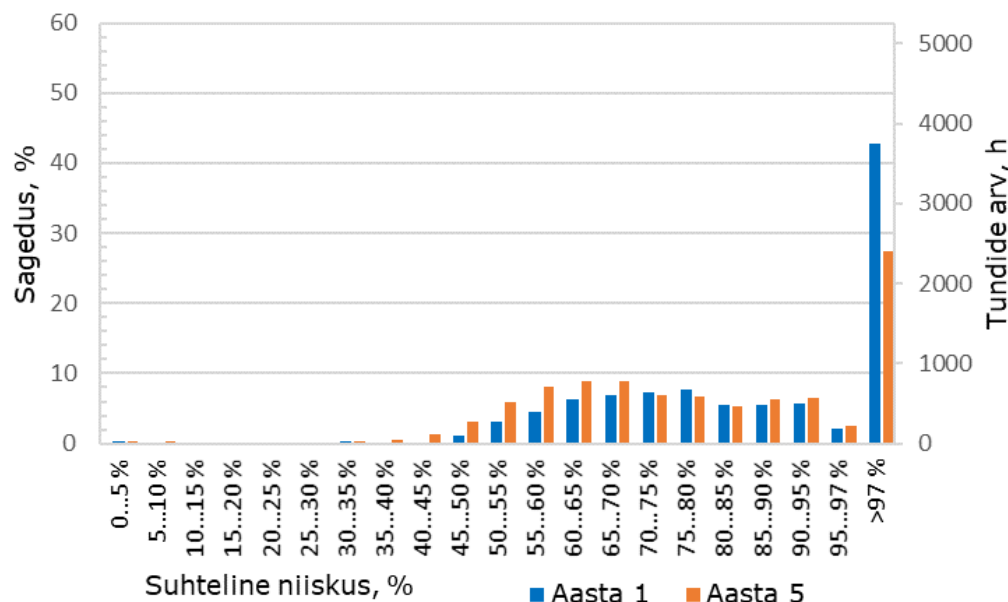
Joonis 3.47 Päikesekiirgusega suhtelise niiskus paneeli keskel madalama algniiskusega välimise teraslehe sisepinnal – arvutustulemused sinisega ning nendele vastav trendjoon mustaga

Tulemustest selgub, et madalama algniiskusega olukorras toimub peamine niiskuse väljakuivamine esimesel poolel aastal. Läänepoolse päikesekiirgusega olukorras saavutatakse esimesel aastal suhtelise niiskuse tase, mis järgnevatel aastatel jääb

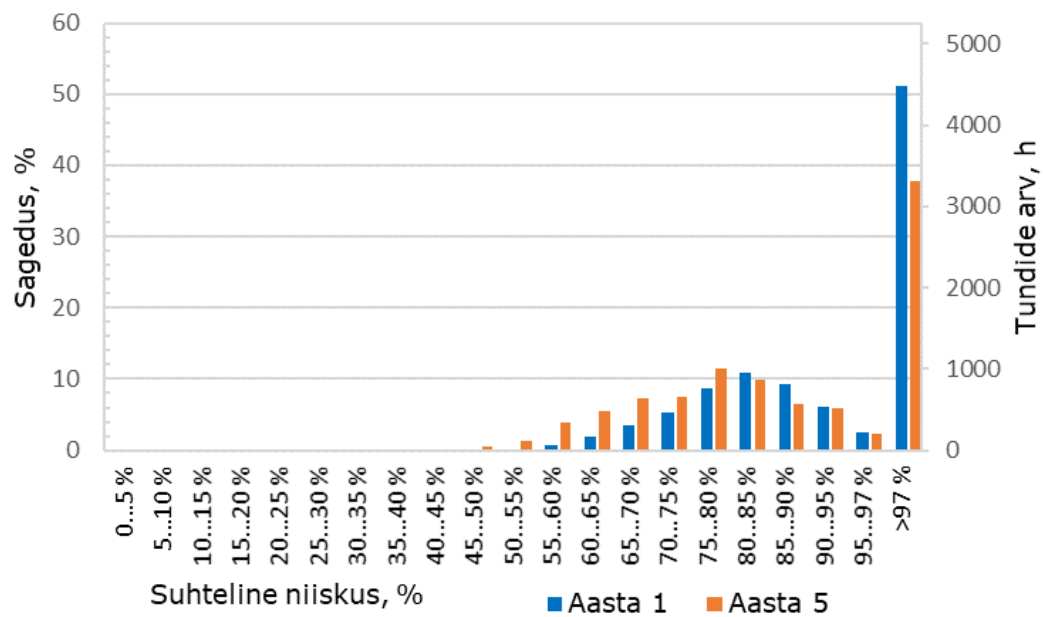
praktiliselt samale tasemele. Samuti ei ole väiksema algniiskusega olukorras probleeme päikesekiirgusega olukorras paneelist niiskuse väljakuivamisel. Esimese aastaga kuivab välja ka suurem osa niiskusest päikesekiirgusega olukorras. Allpool on toodud ka niiskuse esinemise sagedusgraafikud (vt joonis 3.48, 3.49 ja 3.50)



Joonis 3.48 Läänepoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse sagedusgraafik paneeli keskel madalama algniiskusega välimise teraslehe sisepinnal



Joonis 3.49 Põhjapoolse päikesekiirgusega suhtelise niiskuse sagedusgraafik paneeli keskel madalama algniiskusega välimise teraslehe sisepinnal



Joonis 3.50 Päikesekiirguseta suhtelise niiskuse sagedusgraafik paneeli keskel madalama algniiskusega välimise teraslehe sisepinnal

Selgelt on näha, et esimesel aastal on nii päikesekiirgusega olukorras kui ka päikesekiirguseta olukorras välimise teraslehe siseküljel kõrge suhtelise niiskuse tase. Ilma päikesekiirguseta olukorras on üle 97% suhtelise niiskuse taseme esinemissagedus esimesel aastal 52% ja teisel aastal 38%. Läänepoolse päikesekiirgusega on esimesel aastal üle 97% suhtelise niiskuse tase 39% ja viiendal aastal 24%. Põhjapoolse päikesekiirgusega on esimesel aastal on üle 97% suhtelise niiskuse taseme esinemissagedus 43% ja viiendal aastal 27%.

4. ARVUTUSTULEMUSTE ANALÜÜS

Käesoleva lõputöö raames uuritud katsekehade katselised ja arvutusmodelite abil arvutatud tulemuste erinevused jäid valdavalt mõõtevea piiresse. Katsekehade katseliste ja arvutuslike suhtelise niiskuse tulemused erinesid keskmiselt $\pm 3...6\%$. Suurim erinevus oli katsekeha 30 mm teibita avaga olukorras, kus erinevus oli 7% ning väikseim täielikult avatud olukorras 2%. Suurem viga võib olla tingitud mudeldamise ebatäpsusest, deklareeritud materjaliomaduste varieeruvusest ning mõõteseadmete mõõtetäpsusest.

Katsetulemusena selgus, et katsekehal, mis alguses kaeti bituumenlindiga ning asendati küllastusolukorra saavutamisel veeauru läbilaskva teibiga, ei lange suhtelise niiskuse tase pärast bituumenlinde asendamist samale tasemele, kui katsekehal, mis algselt jäeti katmata ning hilisemas etapis kaeti aurutõkestava teibiga. See võib olla tingitud hüstereesist. Samale tasemele jõuti, kui katse ajal tõsteti temperatuuri testruumis. Osaliselt võib viga olla tingitud ka arvutustäpsusest.

Katsekehade suhtelise niiskuse graafikutelt on näha, et võrreldes ilma teibita olukorraga avaldab veeauru läbilaskev teip märgunud paneelist niiskuse väljakuivamisele negatiivset mõju. Katsekehades on veeauru läbilaskva teibiga kaetud katsekehade suhteline niiskus tunduvalt kõrgem kui ilma teibita katsekehade olukorras. Teibita olukorras on niiskuse väljakuivamise voog kaks korda suurem kui veeauru läbilaskva teibiga olukorras. Samuti on katsetulemuste graafikutelt näha, et veeauru takistava teibiga ei kuiva katsekehadest praktiliselt niiskust üldse välja. Katsekehade niiskusvoogude graafikutelt on näha, et toatemperatuuril on teibita olukorras niiskuse väljakuivamise pinnaühiku kohta 20 korda suurem kui suure difusioonitakistusega teibiga.

Katse ja arvutusmodelite niiskuse väljakuivamise voo graafikutelt on näha, et pealt täiesti avatud ja 30 millimeetrise avaga teibita olukorra vahel niiskusvoogudes suurt erinevust ei esine. Tulemustest võib näha, et niiskusvoog pinnaühiku kohta on mõlemas olukorras praktiliselt sama.

Arvutusmodeli tulemustest on näha, et niiskuse sattumisel sändvitšpaneeli on kõige kriitilisemaks kohaks välise teraslehe sisekülg, kus suhtelise niiskuse tase ületab sagedasti hügrokoopse ala ülempiiri. Kõige kriitilisemaks perioodiks on talv, mil temperatuur on alla $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja on oht jäätumisele. Mida lähedamale avale jääb asukoht, seda kiiremini kuivab välja niiskus. Väljakuivamise kiirus on suuresti mõjutatud päikesekiirguse mõjust. Algniiskuse $0,132\text{ kg/m}^3$ ja $0,3\text{ kg/m}^3$, mis vastavad

tasakaaluniiskuse juures suhtelise niiskuse tasemetele 80% ja 97%, puhul erinevad kogu paneelis olukorrad vaid väljakuivamise aja pikkuse poolest. Kõrgema algniiskusega ($0,3 \text{ kg/m}^3$) olukorras kulub tasakaaluniiskuse saavutamiseks päikesekiirguse soodustava mõjuga aasta ning päikesekiirguseta kaks aastat. Madalama algniiskusega ($0,132 \text{ kg/m}^3$) olukorras saavutatakse tasakaaluniiskuse sändvitšpaneelis päikesekiirguse soodustava mõju abil poole aastaga ning päikesekiirguseta olukorras ühe aastaga.

Arvutusmudelite tulemustes on näha, et päikesekiirgus suurendab niiskuse väljakuivamise kiirust. Antud uurimustöös teostati ainult lääne- ja põhjapoolse päikesekiirguse mõju ning läänepoolse asetusega paneelist kuivas niiskus kiiremini tasakaaluniiskuseeni.

Uurimuse käigus selgus, et niiskuse tase on välimise teraslehe sisepinnal väga pikaajaliselt üle hügrokoopse ala ülempiiri, mistõttu tuleks edasistes uuringutes täpsemalt uurida niiskuse mõju teraslehele, niiskuse ja kondenseerunud vee mõju kivivilla ja teraslehe vahelisele liimile. Samuti tuleks uurida niiskuse väljakuivamise suurendamise võimalusi.

5. JÄRELDUSED

Teraslehtedega kaetud kivivilla sändvitšpaneeli niiskustehnilise toimivuse osas võib välja tuua järgmised järeldused:

- Sändvitšpaneelis on niiskuse tase kõrgeim välimise teraslehe siseküljel ning kõige kriitilisem asukoht on avast kaugeimas punktis.
- Talvel on sändvitšpaneeli sattunud liigniiskuse korral paneeli välimise teraslehe siseküljel niiskuse tase kõrgeim, kuna suhtelise niiskuse tase on ületab 97% ja on oht kondenseerunud veeauru jäätumisele.
- Pärast esimest aastat aligniiskusega $0,3 \text{ kg/m}^3$ sändvitšpaneeli vuugi läheduses teraslehe sisepinnal hügroskoopsuse ala ülempiiri praktiliselt ei ületata. Sändvitšpaneeli vuugist kolme meetri kaugusel ületatakse aastas ülempiir päikesekiirguse mõjuga 24...28% ajast ning päikesekiirguseta olukorras 38% ajast.
- Sändvitšpaneelis aligniiskusega $0,3 \text{ kg/m}^3$ (tasakaaluniiskuse juures suhtelise niiskuse tase 97%), kuivab välimise teraslehe sisepinnal niiskus tasakaaluniiskuseni päikesekiirguse mõjul esimese aastaga, päikesekiirguseta olukorras kahe aasta jooksul. Sändvitšpaneelis aligniiskusega $0,132 \text{ kg/m}^3$ (tasakaaluniiskuse juures suhtelise niiskuse tase 80%) kuivab välimise teraslehe sisepinnal niiskus sändvitšpaneelist niiskus tasakaaluniiskuseni päikesekiirguse mõjul poole aastaga ja päikesekiirguseta olukorras ühe aastaga. Selle põhjal võib järeldada, et päikesekiirguse mõju soodustab niiskuse väljakuivamist sändvitšpaneelist.
- Ühemõõtmelises olukorras on sändvitšpaneel modelleeritav, kuid mudeliga ei ole võimalik teostada arvutusi piisava täpsusega. Väljakuivamise modelleerimiseks on vaja arvutused teostada kahemõõtmelises olukorras.
- Ehituse ajal on oluline jälgida, et liigniiskus ei satuks paneeli ning kivivilla pealt eemaldatakse veeauru tõkestav teip vahetult enne pealmise paneeli paigaldust.

Erinevate teipide mõju hindamise osas niiskuse väljakuivamisele võib esile tuua järgmised järeldused:

- Veeauru läbilaskva teibiga (S_d -väärtus $0,05\text{m}$) on toatemperatuuril niiskuse väljakuivamine pinnaühiku kohta kaks korda väiksem kui teibita olukorras.

- Veeauru takistava teibiga (S_d -väärtus 15m) on toatemperatuuril niiskuse väljakuivamine pinnaühiku kohta 20 korda väiksem kui teibita olukorras.
- Teibiga katmata ava puhul ei sõltu niiskuse väljakuivamine pinnaühiku kohta katmata ava suurusest.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö raames on uuritud teraslehtedega kaetud kivivillast soojustusega sändvitšpaneelide niiskustehnilist toimivust. Eesmärgiks oli analüüsida erinevate teipide mõju sändvitšpaneelist ehitusniiskuse väljakuivamisele, hinnata ühe- ja kahemõõtmelise arvutusmodeli täpsust kolmemõõtmelise olukorra lahendamiseks, hinnata paneeli kivivilla kuivamispotentsiaali ning koostada kalibreeritud arvutusmodel reaalse olukorra hindamiseks.

Uurimuse käigus ehitati kolm katsekeha, kus katsetati erinevates olukordades niiskuse väljakuivamise potentsiaali ning kivivilla veeauru läbilaskevõimet. Katsekehad paigaldati Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoonesse ja selle vahetusse lähedusse ning 84 päeva pikkusel katseperioodil registreeriti andurite abil iga tunni aja tagant temperatuuri ja suhtelise niiskuse andmed katsekehas erinevatel kõrgustel. Katsekehadest saadud mõõtetulemusi kasutati, et võrrelda arvutusmodeli arvutustäpsust ning hinnata arvutuste vastavust katsetulemustega. Katse ajal kasutati ääritingimustena katsekehade lähedusse paigaldatud andurite tulemusi. Katsetulemusi kasutati arvutusmodeli loomiseks, mille abil teostada edasised arvutused.

Niiskustehnilise toimivuse seisukohalt on oluline vältida liigniiskuse tõttu kivivillast tekkivat veeauru kondenseerumist. Veeauru kondenseerumise vältimist kasutati kriteeriumina niiskustehnilise toimivuse hindamisel. Veeauru kondenseerumist tarindis hinnati hügrokoopse ala ülempiiri ületamisega, milleks on suhtelise niiskuse tase 97%.

Katsetulemuste põhjal loodud valideeritud arvutusmodelit kasutati reaalsel olukorda jäljendava arvutusmodeli loomiseks, kus kasutati sändvitšpaneeli mõõtudega 6m x 1,2m x 0,23m ning reaalseid väliskliima andmeid. Väliskliima ääritingimustena kasutati Väike-Maarja 1995-96 aasta kliimaandmeid (kondensaadi testaasta) (Kalamees & Vinha, 2004) ning sisekliima puhul on kasutatud (Kalbe et al., 2020) poolt esitatud välistemperatuuri tulemuste põhjal arvutusmodelisse loodud andmeid. Niiskuse väljakuivamist sändvitšpaneelist hinnati aligniiskuse väärtuste 0,132 kg/m³ ja 0,3 kg/m³, mis vastavad sändvitšpaneeli sattunud veekogustele 0,22 kg ja 0,5 kg, korral avast erinevatel kaugustel olevates mõõtepunktides. Lisaks hinnati päikesekiirguse mõju niiskuse välja kuivamisele paneelist.

Arvutustulemustest selgus, et kõige kriitilisemaks asukohaks on sändvitšpaneeli välimise teraslehe sisekülj, kus veeaur kõige sagedamini kondenseerub, ja kõige

kriitilisemaks perioodiks talv, kus temperatuur on alla 0 °C ja on oht jäätumiseks. Kõige kriitilisemaks kohaks osutus paneelivuugist kolme meetri kaugusel paiknev arvutuspunkt. Sealt kuivas niiskus päikesekiirguse mõjul sändvitšpaneelis tasakaaluniiskuseni (suhtelise niiskuse tasemeni 97%-ni) kõrgema algniiskusega (0,3 kg/m³) olukorras esimese aastaga ja madalama algniiskusega (0,132 kg/m³) olukorras poole aastaga. Päikesekiirguseta olukorras kuivab niiskus kõrgema algniiskusega (0,3 kg/m³) paneelis kahe aastaga ja madalama algniiskusega (0,132 kg/m³) paneelis ühe aastaga.

Uurimuse käigus selgus, et sändvitšpaneeli sattunud liigniiskuse puhul on niiskuse tase välimise teraslehe sisepinnal pikaajaliselt üle hügrokoopse ala ülempiiri, mistõttu tuleks edasistes uuringutes täpsemalt uurida niiskuse mõju teraslehele, niiskuse ja kondenseerunud vee mõju kivivilla ja teraslehe vahelisele liimikihi nakkele.

SUMMARY

This master's thesis incorporates a research which focuses on studying the hygrothermal performance of steel-coated lightweight stone wool sandwich-panels. The purpose was to create and validate a simulation model based on the results of the implemented study, evaluate and compare the accuracy of 1D and 2D simulation models, assess the drying-out potential of sandwich-panels with stone wool core and to analyze the impact of sealants with low and high water vapour permeability values on the drying out process of the sandwich-panels.

During the research three different testwalls were set up to evaluate the drying out potential in different boundary conditions. The testwalls were installed to a testroom located in the near-zero energy test building of Tallinn University of Technology (TUT) at Mäepealse 3, Tallinn and under a canopy built near the test building of TUT. During the 84-day test period hourly data of relative humidity and temperature in different areas inside the testwalls was collected. During the test period, data about boundary conditions was collected by a sensor located about 10 centimeters above the testwalls. Received data was used to create a simulation model, which was used as a basis for further calculations and simulations.

For the hygrothermal safety of the structure, it is important to avoid vapour condensation of the excess moisture in the structure. Avoidance of vapour condensation is used as the main criteria to evaluate the hygrothermal safety of the testwalls. Vapour condensation takes place after the hygroscopic area upper bound (relative humidity level of 97%) is surpassed.

Validated simulation model, which was based on collected data from the sensors in the testwalls, was used to create a new simulation model based on true measurements of the sandwich-panels and Nordic climate was used as a boundary condition. New simulation model describes a sandwich panel with measurements of 6m x 1,2m x 0,23m. Väike-Maarja 1995-96 outdoor climate data (condensate year) (Kalamees & Vinha, 2004) was used as an outdoor boundary condition for the calculation process. Graph presented by (Kalbe et al., 2020) was used to derive indoor temperature from outdoor temperature. Moisture dry-out from sandwich-panel was evaluated with initial moisture content of 0,132 kg/m³ and 0,3 kg/m³. Different distances from the joint with 1-metre intervals were analyzed to determine the most hygrothermal critical layer and distance from the joint inside the sandwich-panel.

Results from the simulation model showed that the most hygrothermal critical location where the risk for condensation was the highest, was inside the sandwich-panel, near the outer steel-sheet layer farthest from the panel joint. Results showed that winter period where temperature is frequently below 0 °C and is a risk for icing is the most critical. From the middle of the sandwich-panel with sun radiation impact, sandwich panel with higher initial moisture content (0,3 kg/m³) reaches equilibrium moisture content in a one year period and sandwich-panel with lower initial moisture content (0,132 kg/m³) reaches equilibrium moisture content in 6 months period. Without the impact of sun radiation the dry-out period is twice as long.

During the study it was found that most hygrothermal critical location is near the outer steel-sheet layer and therefore it is important to research in further studies what impact has moisture on steel-sheet and how condensation impacts glue between the insulation and steel-sheet.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Crewe, R. J., Hidalgo, J. P., Sørensen, M. X., McLaggan, M., Molyneux, S., Welch, S., Jomaas, G., Torero, J. L., Stec, A. A., & Hull, T. R. (2018). Fire Performance of Sandwich Panels in a Modified ISO 13784-1 Small Room Test: The Influence of Increased Fire Load for Different Insulation Materials. *Fire Technology*, 54(4), 819–852. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0703-5>
- Daugevičius, M., Skuturna, T., Valivonis, J., & Patapavičius, A. (2019). Shear Failure of Sandwich Panels Subjected in Bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012060>
- Grunewald, J., & Nicolai, A. (2015). *Delphin 5 User manual and program reference*. Technische Universität Dresden.
- Jerman, M., & Černý, R. (2012). Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*, 53, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.002>
- Kalamees, T. (2014). *Hoonete energiatõhususe uuringuid puudutav ümarlaud esitlusslaudid*.
- Kalamees, T., & Vinha, J. (2004). Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations. *Journal of Building Physics*, 27(3), 199–220. <https://doi.org/10.1177/1097196304038839>
- Kalbe, K., Piikov, H., Kesti, J., Honkakoski, E., Kurnitski, J., & Kalamees, T. (2020). Moisture dry-out from steel faced insulated sandwich panels. *NSB 2020, Tallinn, Estonia*.
- Morishita, C., Berger, J., & Mendes, N. (2020). Weather-based indicators for analysis of moisture risks in buildings. *Science of the Total Environment*, 709, 134850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134850>
- Othman, N. L., Jaafar, M., Harun, W. M. W., & Ibrahim, F. (2015). A Case Study on Moisture Problems and Building Defects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 170, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.011>
- Peuhkuri, R. (2003). *Moisture Dynamics in Building Envelopes*. Technical University of Denmark.
- Pihelo, P. (2015). *Madal- ja liginullenergiahoone puitsõrestikseina niiskustehniline toimivus* [Tallinna Tehnikaülikool]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Russak, V., & Kallis, A. (2003). Eesti kiirguskliima teatmik. *Eesti Meteoroloogia Ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn*, 1–384. http://scholar.google.com/scholar?q=related:00ptDt64mSEJ:scholar.google.com/&hl=en&num=20&as_sdt=0,5
- Ruukki Oy. (2017). *Assembly instructions for sandwich panels spa*.
- Sontag, L., Nicolai, A., & Vogelsang, S. (2013). *Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin*. 1–80. <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/12896/DelphinValidierung.pdf>

Wall sandwich panels. (n.d.).

<https://isobud.com/en/production/sandwich/stenovye-sendvich-paneli>
(17.05.2020)

Weiland, F., Kirchner, M., Rensinghoff, V., Giovannetti, F., Kastner, O., Ridder, D., Tekinbas, Y., & Hachul, H. (2019). Performance assessment of solar thermally activated steel sandwich panels with mineral wool core for industrial and commercial buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, 1343(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012098>

LISA 1 Moisture dry-out from steel faced insulated sandwich panels

Kristo Kalbe^{1*}, Hubert Piikov¹, Jyrki Kesti², Erkki Honkakoski², Jarek Kurnitski¹, Targo Kalamees^{3,1}

¹Tallinn University of Technology, nZEB Research Group, Tallinn, Estonia

²Ruukki Construction Oy (SSAB), Hämeenlinna, Finland

³Smart City Center of Excellence (Finest Twins), Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, Tallinn, Estonia

Abstract. This study analyses moisture dry-out from a steel faced insulated sandwich panel. Three test walls, with lower parts close to the free water level, were studied in a laboratory under different climatic conditions to measure their dry-out capacity and to obtain data for simulation model calibration. The hygrothermal simulations were done with the simulation tool Delphin in stable climatic conditions to determine the magnitude of the moisture dry-out capacity. Comparison of the measured and simulated relative humidity showed sufficiently good agreement. The results indicate that panels of this type have some dry-out capacity under summer and spring climatic conditions (about 2–3 g/day at best) but during autumn and winter their dry-out capacity is limited. In case of a water leakage (e.g. due to rain during the installation of the panels), the moisture dry-out is negligible. To minimise the wetting of insulation, weather protection during construction and during storage is necessary.

1 Introduction

The use of prefabricated building elements increases construction efficiency [1], reduces construction waste [2] and could reduce greenhouse gas emissions [3]. Lu found that using steel faced sandwich panel assemblies is one of the most optimal levels of prefabrication, especially for urban high density construction sites [4]. In addition to the construction of new buildings the use of two-dimensional prefabricated panels has also gained popularity in the renovation of buildings [5,6] and marine applications [7]. Steel faced sandwich panels, filled with polyurethane or mineral wool, are widely used in warehouses, industrial and commercial buildings. The yearly installed area of these panels amounts up to 130 million m² in Europe [8].

Based on the Construction Products Regulation [9], buildings must be designed and constructed so as not to endanger human health as a result of high humidity. The steel faced insulated sandwich panel is quite moisture resistant as it is covered with a water and vapour tight surface (steel). When joints of the panels are tight, the building envelope is tolerant to moisture movement by diffusion and convection as well as to free water flow. However, if water can penetrate into the insulation space, the dry-out period could be very long, causing moisture related problems to the panel itself. Previous research has shown that the drying out of moisture could significantly influence the overall hygrothermal performance of the building envelope [10–13].

This study analyses the moisture dry-out from a steel faced insulated sandwich panel by applying laboratory measurements and hygrothermal modelling. The moisture dry-out is also studied for different tapes used for covering the joints of the panels in wall assemblies.

2 Methods

2.1 Laboratory measurements

A series of tests were conducted in the TalTech nZEB test facility to study the water vapour distribution and moisture dry-out speed in the steel faced insulated sandwich panel. The indoor temperature and humidity of the test facility can be controlled as necessary. Measured data from the tests was also used for calibrating hygrothermal models. Three test walls (TW) were cut from sandwich panels used in a previous study conducted in HAMK Tech in Finland [14]. See Fig. 1 for a descriptive drawing of the TW.

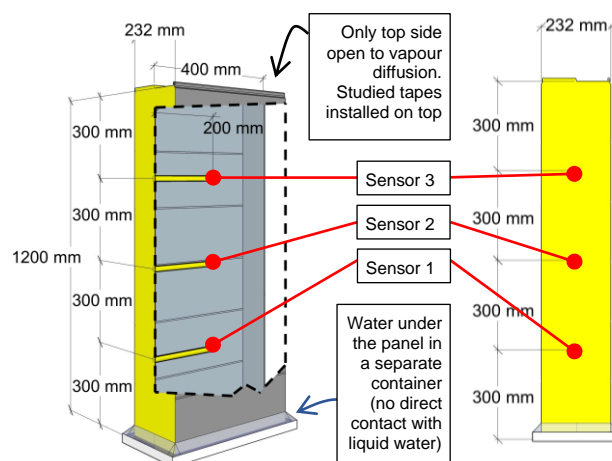


Fig. 1. A 3D and a 2D section cut of a test wall with sensor locations indicated.

Both TW1 and TW2 were cut in a manner that the longer sides are parallel to the insulation fibres and TW3 was cut so that the longer sides are perpendicular to the insulation fibres. The sides (full measurement period) and top (limited periods) of the TWs were covered with a self-adhesive tape with an aluminium foil surface (Flashband - Soudal Butyband Flashing Tape 10 m × 300 mm) to prevent vapour diffusion through the sides. Stainless steel water containers were placed under the TWs and filled with 1500 g of water for each TW to study the water vapour pressure distribution in the panel (mimicking a scenario where water has accumulated under the panels, e.g. in a plinth rail). Liquid water did not come into direct contact with the TWs. The bottom of the wall was open towards the water (via ~10 mm of air). The connection of the water container and TW was sealed with an aluminium tape.

An array of temperature and relative humidity sensors with data loggers (HOBO UX100-023) measured the water vapour pressure distribution. Three sensors were installed on the centre line of the panel at equal distances from each other (Fig. 1). The sensors were installed from the sides of the panel and the sensor cable openings were sealed to minimise external influences on the measurements.

To study the moisture dry-out through a vapour permeable (S_d or equivalent air layer thickness = 0.05 m) and a vapour retarding ($S_d = 15$ m) tape, a 30 mm × 375 mm aperture was covered with a tape on the top side of each TW and everything else was sealed vapour tight. The photo in Fig. 2 shows TWs during the installation of tapes on their top surfaces.

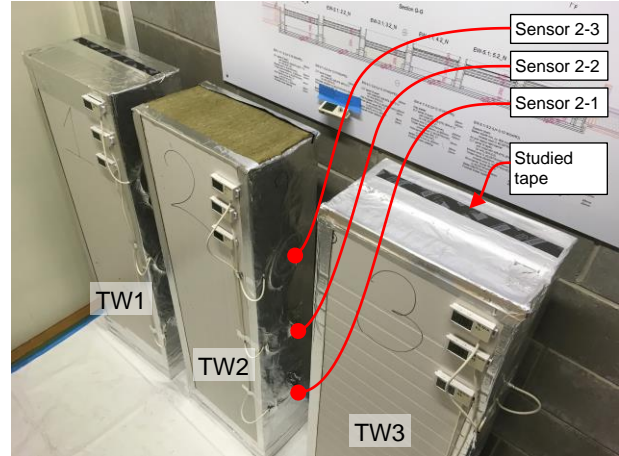


Fig. 2. Test walls during the test. Top surfaces of TW1 and TW3 are covered with sealing foil and vapour permeable tape. TW2 is fully open to diffusion on the top side (tape not yet installed).

Most of the tests were conducted in isothermal conditions ($t \approx 22\text{--}24$ °C) in a test room with relative air humidity (RH) $\approx 30\text{--}50\%$ (Fig. 3). This resulted in a water vapour pressure between 793 and 1266 Pa around the TWs. The water vapour pressure near the water container under the TWs was 2642–3166 Pa. During a two-and-a-half-week period the test specimens were also in outdoor conditions to observe the influence of rapid temperature changes. The general plan of the test is presented in Table 1.

Table 1. Numerical values for the boundary conditions in the first phase of the test.

Test no.	Description	Time, days	t_i , °C (test room)	RH_i , % (test room)	Comments
1	Sandwich panels stored in test facility	35	23–26	30–50	
	Preparation of TWs. Stabilisation in dry conditions	15	23–26	30–50	
2	Water containers installed under TWs. Stabilisation and measuring of saturation speed (TW1) and moisture dry-out and water vapour permeability of mineral wool through fully open top surface (TW2 & TW3)	26	22–24	31–34	TW 1: Fully sealed TW 2: Fully open top surface TW 3: Fully open top surface
		32			
3	Water under TWs, tapes installed over TW top surface aperture (30 mm × 375 mm) Measuring moisture dry-out through aperture with tapes	16	22–24	31–34	TW 1: Tape $S_d = 0.05$ m TW 2: Tape $S_d = 15$ m TW 3: Tape $S_d = 0.05$ m
		21			
4	Water under TWs, some tapes removed Measuring moisture dry-out through aperture without tapes on TW1 & TW3	11	22–24	31–34	TW 1: No tape TW 2: <u>Tape $S_d = 15$ m still on</u> TW 3: No tape
		0			
5	Water under TWs, all tapes removed Measuring moisture dry-out through aperture without tapes on all TWs and with higher temperature	17	31–35	25	TW 1: No tape TW 2: <u>No tape</u> TW 3: No tape
6	Water under TWs, top aperture without tapes and test walls placed outdoors. Studying temperature variation effects and measuring moisture dry-out through aperture without tapes on all TWs in outdoor climate	18	0–10		TW 1: No tape TW 2: No tape TW 3: No tape
					Outdoor RH near saturation level

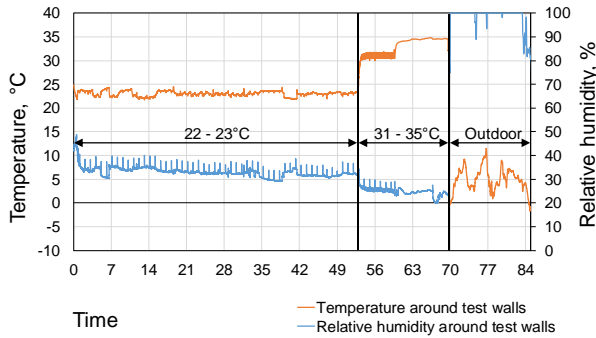


Fig. 3. Temperature and relative humidity during the tests around all sides of the TWs.

2.2 Simulations

The hygrothermal simulations were performed with the simulation tool Delphin [15]. The software is validated [16,17] and it models coupled heat, air and moisture transport. It uses the numerical solution that is done by semi-discretisation in space (by using a finite/control volume method) and subsequent integration in time. Modelling comprises the description of fluxes in the calculation domain or in the field (between volume panels including material interfaces) and at the boundary (between volume panels and exterior or interior rooms) by physical models. Models for storage processes such as adsorption, desorption and release are also included but hysteresis is excluded. The material properties used in the simulations are given in Table 2 and in Fig. 4. Delphin's default functions of material properties that depend on the hygric environment were also included. Steel was modelled as an infinitely vapour tight surface on mineral wool.

Table 2 Material properties of mineral wool used in the modelling of the hygrothermal performance of the sandwich panel.

Material property (base value in dry conditions)	Mineral wool
Bulk density ρ , kg/m ³	85
Thermal conductivity λ , W/(m·K)	0.04
Specific heat capacity c , J/(kg·K)	840
Water vapour diffusion resistance factor μ , -	1.0
Effective saturation θ , m ³ /m ³	0.9
Porosity θ , m ³ /m ³	0.97
Water uptake coefficient A_w , kg/(m·s ^{1/2})	0
Liquid water conductivity kl , kg/(m·s·Pa)	0

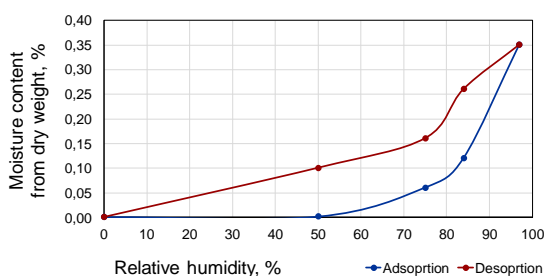


Fig. 4. Adsorption and desorption isotherms of mineral wool.

The hygrothermal models were first calibrated to match the measurements done in the laboratory. The measured environmental conditions (Fig. 3) around the TW were used as climate data in the simulations. On the bottom boundary the RH was set to 100% and no moisture transport was assumed on the sides, leaving only the top surface exposed to moisture exchange.

To study the dry-out capacity of a typical steel faced sandwich panel wall, the simulation models were updated to represent a typical structure where the panels are 6 m long, 3 m high and have a 30 mm vertical connecting joint. The boundary condition on one of the longer sides was simulated as outdoor climate and on the other side as indoor climate. Shorter sides were simulated as adiabatic. For the outdoor climate of these simulations, the Finnish moisture reference year, known as Jokioinen 2004, was used. Jokioinen 2004 is a critical outdoor climate (Table 3) if the internal part of the structure is protected from rain. When using Jokioinen 2004, the key influence comes from the relative humidity of the outside air, whereas the driving rain and solar radiation have a minor effect [18,19]. The model of the dependence of indoor temperature on the daily average outdoor temperature was used (Fig. 5). This model represents typical conditions in heated warehouses. Figure 6 shows a section cut of a steel faced sandwich panel wall assembly with a connecting joint and an excerpt of the simulation model.

Table 3 Monthly and seasonal average climatic conditions from Jokioinen 2004.

Month	Temperature, °C		Relative humidity, %	
January	-7.5	-4.4	92	93
February	-5.0	-4.4	90	93
March	-1.8	4.3	85	70
April	4.9	4.3	60	70
May	9.6	14.5	64	75
June	12.2	14.5	68	75
July	15.5	14.5	78	75
August	15.7	14.5	79	75
September	11.5	5.2	88	91
October	4.8	5.2	90	91
November	-0.7	5.2	94	91
December	-0.8	-4.4	98	93

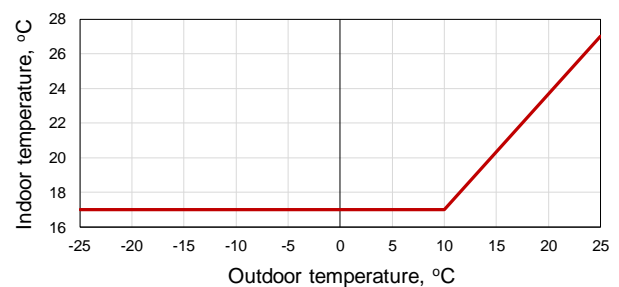


Fig. 5. Dependence of indoor temperature on outdoor temperature.

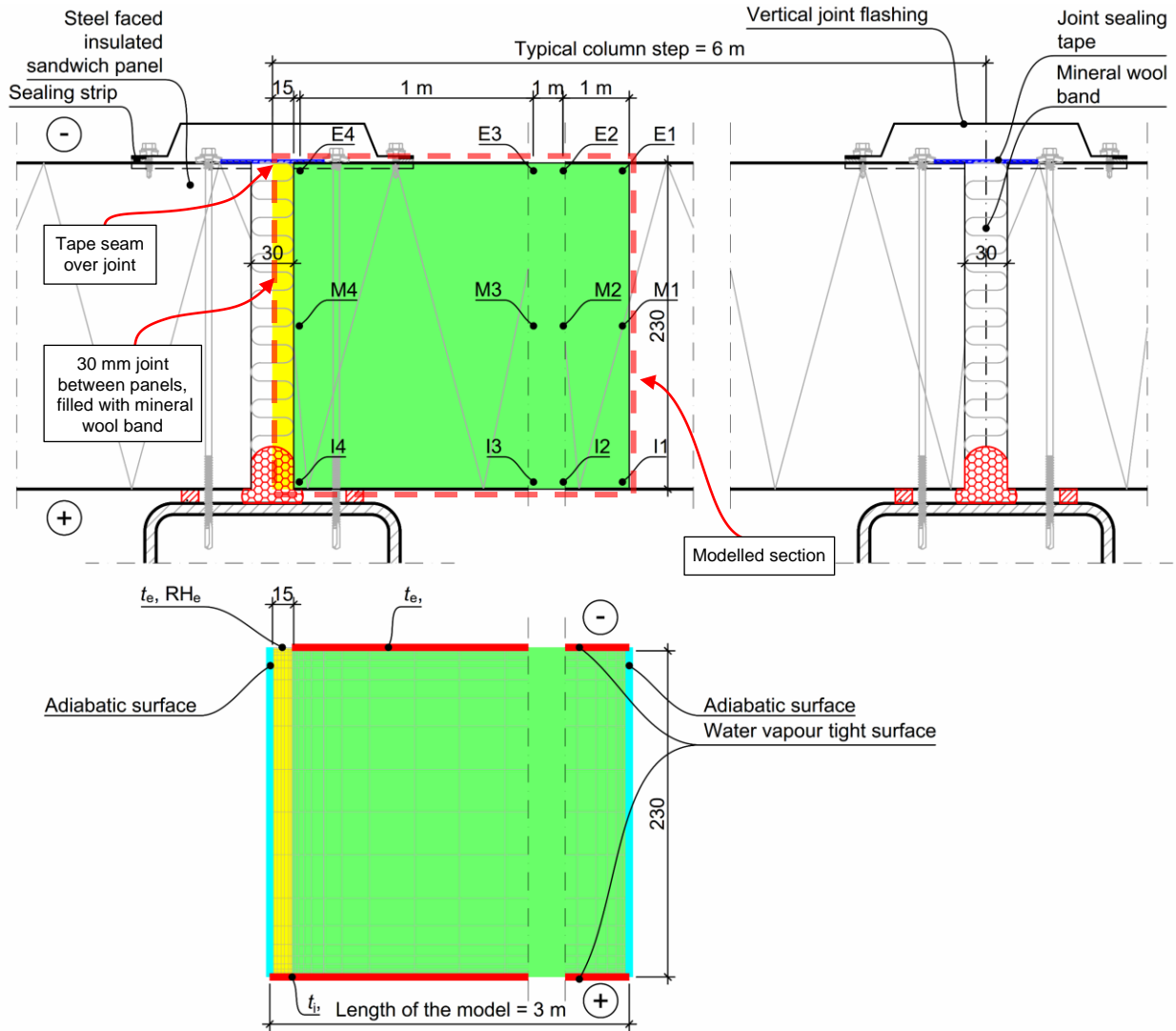


Fig. 6. Horizontal section of a typical external wall constructed with steel faced insulated sandwich panels (above) and the simulation model (below).

3 Results and discussion

3.1 Calibration of the simulation model

As the dry-out occurs horizontally from the middle of the panel towards the joint and the relative humidity equalises quickly, it is possible to model the 3D problem in a 2D model because heat influences the wall from all sides. The 1D model (heat flow only through the top and bottom sides of the TW) gave the correct temperature level but wrong dynamics (simulation showed too large inertia compared to measurements).

The water vapour pressure inside the wall was influenced by water vapour from the water container below the TW (RH 100%) and room air humidity from the top surface (RH \approx 30–50%). Comparison of the measured and simulated water vapour pressures showed good agreement (Fig. 7, left). On day 24 the fully sealed top surface of TW1 was opened to diffusion through the $S_d = 0.05$ m tape and the fully opened top surface of TW3

was covered with aluminium foil and a strip of $S_d = 0.05$ m tape. The hysteresis of water vapour pressure is seen after this event (between days 24 and 41) on TW1 and TW3. Measurements from TW1 (drying) showed higher humidity than simulated during the hysteresis. Measurements from TW3 (moistening) showed good agreement with simulations as the adsorption isotherm was used in the simulations. Although the measured and simulated drying processes are in good agreement, there is a possibility of slight overestimation of drying when using the adsorption isotherm.

Comparison of the measured and simulated relative humidity showed sufficiently good agreement (Fig. 7, right), although the simulation tended to underestimate RH in the high humidity region.

3.2 Dry-out capacity

The simulations were done with constant climatic conditions derived from the seasonal averages of the selected climate data (Table 3 highlighted columns for outdoor climate; Fig. 5 for indoor temperature). Use of

constant climatic conditions allowed us to describe the dry-out capability in the most or least favourable

conditions. The use of constant climate conditions also helps to study the effect of climate on the drying process

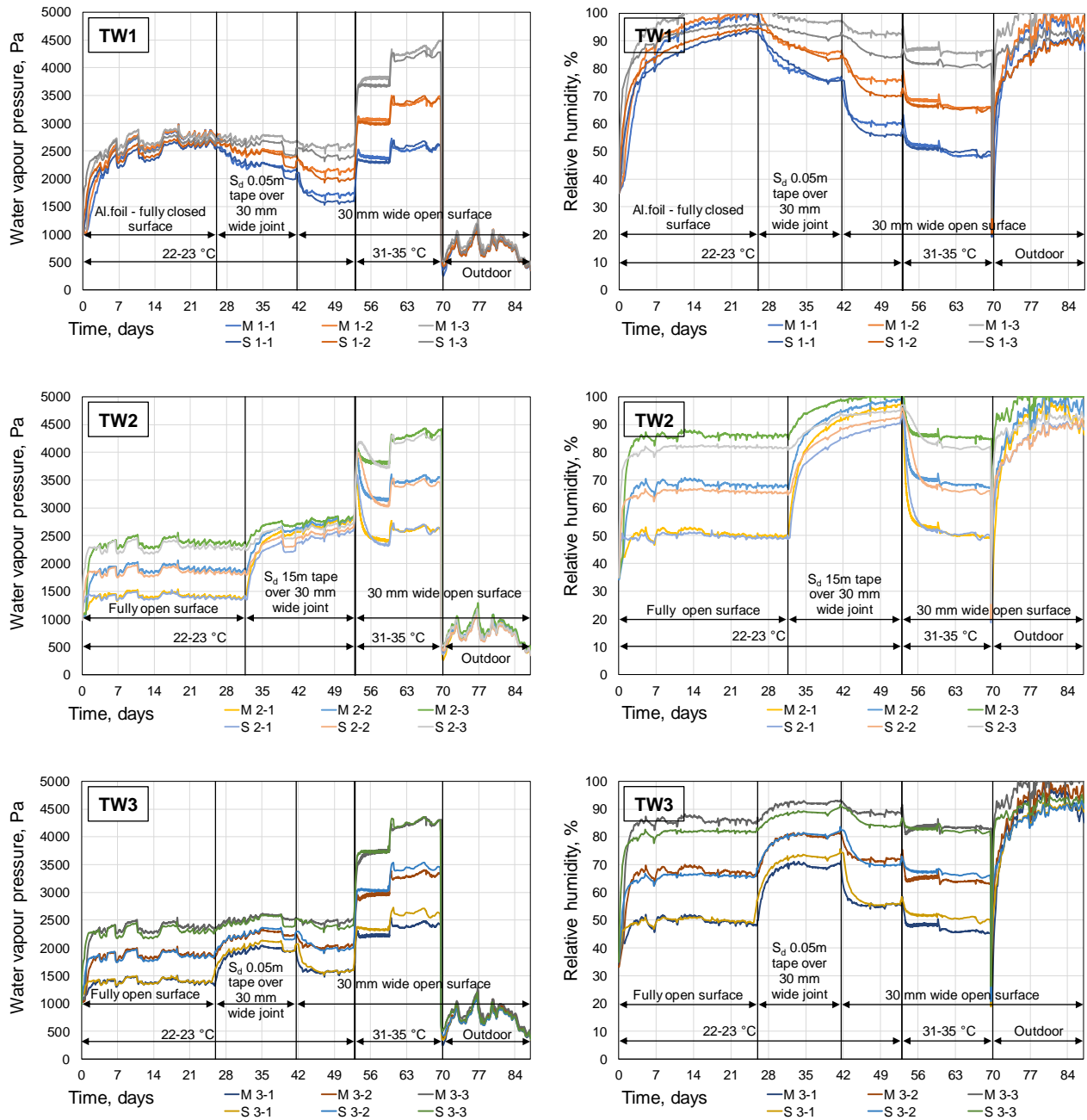


Fig. 7. Comparison of measured (M) and simulated (S) water vapour pressure (left) and relative humidity (right) on the TWs.

because there are fewer variables. If boundary conditions were fluctuating (as in the hourly climate data), the effects of the climate would not be so obvious. The graphs in Fig. 8 show the relative humidity in a 230 mm × 3000 mm sandwich panel in different locations over a 365 day period of constant climate conditions, with a vapour permeable tape ($S_d = 0.05$ m) covering the joints.

Two initial moisture contents were used:

- RH 80% = 1.5 g/kg (according to EN 15026 standard [20]);
- RH 97% = 3.5 g/kg (limit of hygroscopic area).

The initial moisture content describes the amount of moisture inside the panel during the application of tapes (e.g. moisture due to rain that entered the panels during the installation). A moisture content of 1.5 g per 1 kg of mineral wool produces an initial RH of 80% in the panel after sealing tapes are applied over the joints.

Results show that moisture was redistributed very quickly in the panel and excessive moisture accumulated on the inner surface of the external steel sheet (Fig. 9). This happened because mineral wool is very permeable to vapour and without noteworthy moisture storage capacity.

The simulations with constant climate conditions showed that regardless of the initial moisture content high RH levels remained continuous on the external layers of the sandwich panels when autumn- or winter-like conditions persisted. The drying potential was very low during winter and autumn.

Some dry-out capacity existed under summer and spring climatic conditions if the external joint of the sandwich panel was covered with a vapour permeable tape. If summer-like conditions persisted for more than 20 days, the RH levels started to decrease near the joint in case the initial moisture content was 1.5 g/kg (RH 80%). However, if the initial moisture content was 3.5 g/kg (i.e. more rain got into the panel), more than 50 days of persistent summer conditions were needed for the RH to fall below 95% near the joint and even more time was needed to decrease the RH further inside the panel. About 240 to 260 days of persistent summer- or spring-like conditions were necessary for the farthest point from the

joint to start drying. Figure 9 shows the spatial distribution of water vapour pressure and RH in the panel after 100 days of persistent hypothetical summer conditions. It is evident that the area behind the external steel sheet is experiencing near-condensing conditions if it is more than 1.5 m away from the diffusion open joint. However, it is unlikely that these conditions would last this long in a cold and humid climate.

It was found that the moisture dry-out capacity of such panels was very small even in best-case scenarios. Figures 10 and 11 describe the overall moisture dry-out rate from these panels per square metre of the diffusion open aperture. The standard solution with a 30 mm wide seam in the vertical joint would provide an aperture of 0.09 m² per joint if the panels were 3 m high. This means a dry-out rate of about 0.5 to 1.5 g/day with initial RH 80% and 2 to 3 g/day at best with initial RH 97%. The drying process through diffusion is very slow.

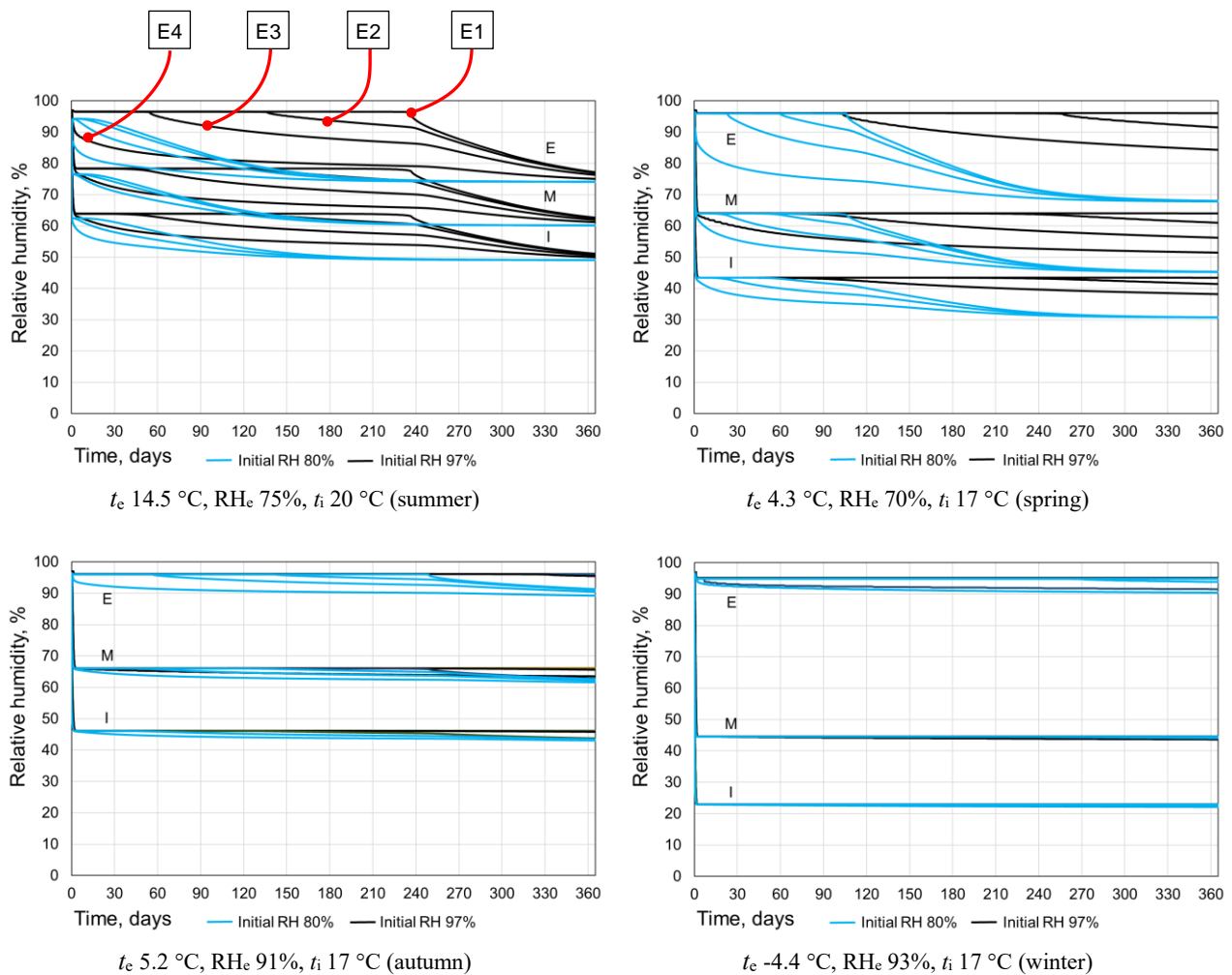


Fig. 8. Simulated relative humidity in steel sandwich panel during 365 days of seasonal average climatic conditions with a vapour permeable tape ($S_d = 0.05$ m) on panel external joints. E = behind the external steel sheet, M = middle of insulation, I = behind the internal steel sheet. The different lines represent different measurement points (e.g. E1...E4) for each location. The lines on the top left chart are referenced, but others are not for readability reasons.

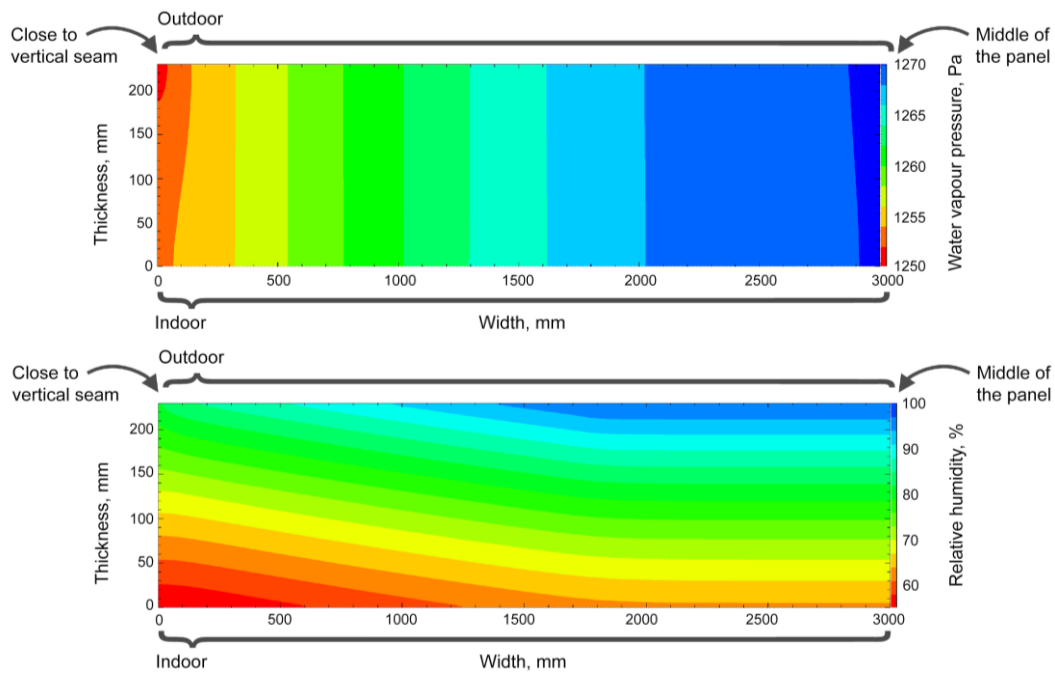


Fig. 9. Distribution of water vapour pressure (above) and RH (below) in a 0.23 m × 3 m panel after 100 days of summer conditions.

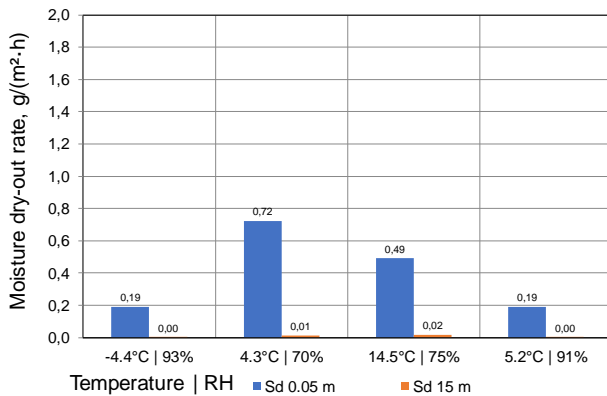


Fig. 10. Moisture dry-out rate per diffusion open aperture in different climatic conditions with initial RH 80%.

4 Discussion

Several indoor humidity models exist [21–23]. In this study no indoor moisture loads were used because the steel faced insulated sandwich panel is assumed to be hermetic on the inner surface and the water vapour pressure is assumed to equalise with the external pressure. Therefore, the RH inside the panel depends on the temperature distribution and outdoor climate and, of course, on the initial moisture content or the amount of water that has entered the panel, for example during construction.

Excess moisture (if it exists) accumulates on the inner surface of the external steel sheet. This region has the largest hygrothermal load because of continuous wet or frost conditions. Solar driven diffusion may redistribute the excess moisture also to the inner surface of the panel.

To minimise the wetting of the panel during construction, weather protection during construction and

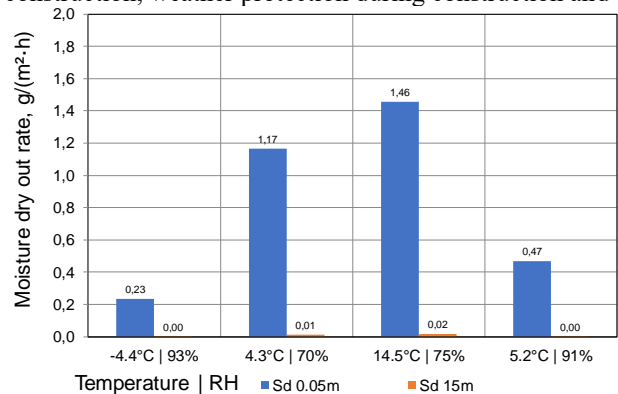


Fig. 11. Moisture dry-out rate per diffusion open aperture at different climatic conditions with initial RH 97%.

during storage is necessary. If the panel has become wet during construction, active air convection might help to activate the drying process.

The following factors have to be taken into consideration for a deeper service life analysis:

- initial moisture content (load);
- water vapour permeability of joint sealing tape;
- distance between joints (drying out area);
- durability of panel:
 - corrosion resistance of panel (depends on humidity (RH, time of wetness), temperature, time, corrosion resistance treatment (zinc and painting);
 - properties of adhesive systems, peeling;

- mould (in insulation) that could be a problem because of spores, fungal allergens, mycotoxins, microbial and volatile organic compounds;
- change of thermal and mechanical properties of insulation (mineral wool).

5 Conclusions

This study analysed the moisture dry-out capacity of a steel faced insulated sandwich panel. A series of laboratory measurements were done to calibrate the hygrothermal simulation models, which were then used to analyse the moisture dry-out capacity of a typical wall assembly in different climate conditions.

The results show that panels of this type have a limited moisture dry-out capacity (about 2–3 g/day at best) if there is a water leakage (e.g. due to improper protection against rain during the installation of the panels). It is recommended that relatively vapour permeable seam tapes should be used in order to enable even this level of drying.

Research is scarce on the performance criteria of these panels and the extent of the problems caused by excessive moisture is unknown. Therefore, it is difficult to conclude whether the low moisture dry-out capacity is a problem or not. This study provides a starting point for future work.

This research was supported by the EC - Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel - HAIR - Improved Durability of Steel Sandwich Panel Constructions regarding Hygrothermal and AIRtightness Performance (grant No. 754185), Estonian Centre of Excellence in Zero Energy and Resource Efficient Smart Buildings and Districts, ZEBE (grant No. 2014-2020.4.01.15-0016) funded by the European Regional Development Fund, by the Estonian Research Council (grant No. PRG483), and by European Commission through the H2020 project Finest Twins (grant No. 856602).

6 References

- Z. Li, G. Q. Shen, and X. Xue, *Habitat Int.* **43**, 240 (2014)
- L. Jaillon, C. S. Poon, and Y. H. Chiang, *Waste Manag.* **29**, 309 (2009)
- C. Mao, Q. Shen, L. Shen, and L. Tang, *Energy Build.* **66**, 165 (2013)
- W. Lu, K. Chen, F. Xue, and W. Pan, *J. Clean. Prod.* **201**, 236 (2018)
- P. Pihelo, T. Kalamees, and K. Kuusk, *Energy Procedia* **132**, 1006 (2017)
- K. Sandberg, T. Orskaug, and A. Andersson, *Energy Procedia* **96**, 756 (2016)
- SAND.CORE, *Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications* (FPG-50633, 2005)
- F. Weiland, M. Kirchner, V. Rensinghoff, F. Giovannetti, O. Kastner, D. Ridder, Y. Tekinbas, and H. Hachul, *J. Phys. Conf. Ser.* **1343**, (2019)
- EU 305/2011, *Off. J. Eur. Union* **5** (2011)
- P. Pihelo, M. Lelumees, and T. Kalamees, *Energy Procedia* **96**, 745 (2016)
- V. Kukk, J. Kers, and T. Kalamees, *Wood Mater. Sci. Eng.* **0**, 1 (2019)
- V. Kukk, A. Külaots, J. Kers, and T. Kalamees, *Can. J. Civ. Eng. cjce* (2019)
- P. Pihelo and T. Kalamees, *Wood Mater. Sci. Eng.* **1** (2019)
- A. J. Laukkarinen, J. Vinha, K. Kalbe, and T. Kalamees, in *Nord. Symp. Build. Phys.* (Tallinn, Estonia, 2020)
- A. Nicolai, *Modeling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Unsaturated Porous Building Materials*, Syracuse University, (2008)
- G. Scheffler, *Validation of Hygrothermal Material Modelling under Consideration of the Hysteresis of Moisture Storage*, Dresden University of Technology, (2008)
- L. Sontag, A. Nicolai, and S. Vogelsang, *Validierung Der Solverimplementierung Des Hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin* (Dresden, 2013)
- J. Vinha, A. Laukkarinen, M. Mäkitalo, S. Nurmi, P. Huttunen, T. Pakkanen, P. Kero, E. Manelius, J. Lahdensivu, A. Köliö, K. Lähdesmäki, J. Piironen, V. Kuhno, M. Pirinen, A. Aaltonen, J. Suonketo, J. Jokisalo, O. Teriö, A. Koskenvesa, and T. Palolahti, *Effects of Climate Change and Increasing of Thermal Insulation on Moisture Performance of Envelope Assemblies and Energy Consumption of Buildings (in Finnish - Ilmastomuutoksen Ja Lämmöneristyksen Lisäyksen Vaikutukset Vaipparakenteiden Kosteusteknisessä)* (Tampere, 2013)
- K. Ruosteenoja, K. Jylhä, H. Mäkelä, R. Hyvönen, P. Pirinen, and I. Lehtonen, *Weather Data for Building Physics Test Reference Years in the Observed and Projected Future Climate - Results from the REFI-B Project (in Finnish Rakennusfysiikan Testivuosiin Sääaineistot Havaitussa Ja Arvioidussa Ilmastossa: REFI-B - Hankkeen Tuloksia)* (Finnish Meteorological Institute, 2013)
- EN 15026, *Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements - Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation* (European Committee for Standardization, Brussels, 2007)
- S. Ilomets, T. Kalamees, and J. Vinha, *J. Build. Phys.* **41**, 547 (2018)
- J. Vinha, M. Salminen, K. Salminen, T. Kalamees, J. Kurnitski, and M. Kivistö, *J. Build. Phys.* **42**, 239 (2018)
- S. Ilomets, T. Kalamees, and F. Tariku, *Can. J. Civ. Eng.* **46**, 963 (2019)