TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

VIHMALEKKE MÕJU PUITKIUDSOOJUS-ISOLATSIOONI LIITSÜSTEEMIGA KAETUD MASSIIVPUIDUST VÄLISPIIRETE SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISELE TOIMIVUSELE

THE IMPACT OF RAINWATER INFILTRATION ON THE HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF MASS TIMBER EXTERNAL WALLS COVERED WITH WOOD FIBRE INSULATION BASED ETICS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kevin Saare

Üliõpilaskood: 182373EAEI

Juhendaja: Villu Kukk

Tallinn 2023

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.

“.....” 2023

Autor: .....
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2023

Juhendaja: .....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....2023.

Kaitsmiskomisjoni esimees .....
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]

Mina, Kevin Saare (sünnikuupäev: 16.08.1997)

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

„Vihmalekke mõju puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele"

,mille juhendaja on Villu Kukk,

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

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

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

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

---

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

_____ (*allkiri*)

_____ (*kuupäev*)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kevin Saare, 182373EAEI

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

Juhendaja(d): Ekspert, Villu Kukk, 6202402

Lõputöö teema:

Vihmalekke mõju puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele

(inglise keeles) The impact of rainwater infiltration on the hygrothermal performance of mass timber external walls covered with wood fibre insulation based ETICS

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud CLT paneeli soojus- ja niiskustehniline toimivus välispiirdena.
2. Tarindi võimalikult täpse arvutusmudeli koostamine ja valideerimine katsetulemustega.
3. Vihmalekke mõju hindamine tarindi soojus- ja niiskustehnilisele toimimisele.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	CLT katsemaja mõõtesüsteemide paigaldus.	01.12.2022
2.	Kirjanduse ülevaade.	19.01.2023
3.	Metoodika andmete analüüsiks ja hindamiseks. Mudelite koostamine.	01.03.2023
4.	Mõõteperioodi lõpp.	28.04.2023
5.	Andemete analüüs ja hindamine. Järeldused.	05.05.2023
6.	Lõputöö vormistamine ja esitamine.	08.05.2023

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "15" mai 2023 a.

Üliõpilane: Kevin Saare ..... "....."....2023 a.
/allkiri/

Juhendaja: Villu Kukk ..... "....."....2023 a.
/allkiri/

Konsultant: .... "....."....2023 a.
/allkiri/

Programmijuht: ..... "....."....2023 a.

Kokkuvõte

Antud lõputöös on uuritud vihmalekke mõju puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele. Eesmärgiks oli koostada tarindile valideeritud arvutusmudel, mille abil hinnata ristlõike soojus- ja niiskustehnilist käitumist ning vihmalekke mõju selle toimimisele. Uurimuseesmärgi täitmiseks teostati mõõtmised Tallinna Tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituudi uurimisrühma poolt rajatud ristkihtliimpuidust testmajas, et koguda andmeid koostatava arvutusmudeli kalibreerimiseks. Mõõtmisteks kasutatud välisseinas kasutati soojustusena puitkiudplaati Steico Protect M Dry. Katsesein oli jaotatud viieks osaks, millest kaks ristlõiget olid puidu ja soojustuse vahelise aurutõkkega ning ülejäänud ilma. Töös kasutati 125 päeva jooksul tunniajase intervalliga fikseeritud temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse väärtusi algusega 1.jaanuar 2023. Mõõteperioodi lõpus imiteeriti neljas seinas kuu aja jooksul erinevates tarindi vahekihtides vihmaleket, et hinnata selle mõju mõõdetavatele väärtustele, seejuures viies sein jäi referentsseinaks.

Välisseina niiskustehnilise toimivuse kriteeriumiks määrati hallituse tekke vältimine. Selle hindamiseks kasutati hallitusindeksit, mis määrati eelnevalt valideeritud arvutusmudeliga kasutades välistingimustena hallituse testaasta (Kalamees & Vinha, 2004) kliimaandmeid ja sisekliimas (Ilomets et al., 2018) mudelit. Hallitusindeksi kriitilise piiri valimisel lähtuti (Viitanen et al., 2015) klassifikatsiooni kirjeldusest.

Mõõtetulemuste põhjal valideeritud mudeliga teostatud arvutused näitasid, et puitkiudsoojusisolatsioonil põhineva ETICS-iga kaetud massiivpuidust välissein on niiskustehniliselt riskantne lahendus, kuna CLT paneeli ja soojustuse vahel on kõrge hallituse tekke oht. Aurutõkkega ristlõike toimivus on puidu kaitsmise seisukohalt parem, kuid siiski hallituse tekke eeldustega. Niiskus ei saa tarindist väiksema niiskuskoormusega perioodil piisaval määral välja kuivada ja niiskus akumuleerub. Seina toimivuse tagamiseks oleks vajalik tagada soojustuse tuulutus. Arvutuste kohaselt tõstab CLT paneeli ja soojustuse vahekihis esinev ühe protsendiline vihmaleke veidi tarindi hallitusindeksi väärtust, kuid olulist mõju ristlõike niiskustehnilisele toimivusele ei tekita. Ebamääraste materjali omaduste tõttu võib aga arvutusmudeli usaldusväärsuses kahelda ning täiendavad uurimused võivad aurutõkkega tarindi niiskustehnilist toimivust kinnitada.

Summary

This thesis examines the impact of rainwater infiltration on the hygrothermal performance of mass timber external walls covered with wood fibre insulation based ETICS. The objective was to develop a validated calculation model for the structure, which would be used to assess the hygrothermal performance of the cross-section, as well as the impact of rain penetration on its performance. Measurements were taken at a cross-laminated timber test house built by the research group of the Estonian University of Technology's Department of Construction and Architecture to gather data for calibrating the calculation model. The examined external wall used a wood fibre insulation board, specifically Steico Protect M Dry. The test wall was divided into five sections, two of which had a vapor barrier between the mass timber panel and insulation, while the others did not. Temperature and relative humidity values were measured hourly for 125 days beginning on January 1, 2023. At the end of the measuring period, rainwater infiltration was simulated for one month in different layers of the four wall sections to assess its impact on the measured values, with the fifth wall serving as a reference.

The criteria for a functioning exterior wall solution was the prevention of mold growth, which was evaluated using a mold index determined by the validated calculation model with the mold risk test reference year (Kalamees & Vinha, 2004) outdoor climate data and (Ilomets et al., 2018) indoor climate model. The critical value for the mold index was chosen based on the classification description by (Viitanen et al., 2015).

The calculations performed using the validated model based on the measurement results showed that the mass timber external wall covered with ETICS based on wood fibre thermal insulation is a risky exterior solution regarding hygrothermal performance due to the high likelihood of mold growth between the CLT panel and insulation. The performance of the cross-section with a vapor barrier is better for protecting the wood panel but still has a risk of mold growth. Moisture cannot sufficiently dry out of the structure during periods of lower moisture load and accumulates. To ensure the wall's hygrothermal performance, ventilation of the insulation would be necessary. According to the calculations, a one percent rainwater penetration in the layer between the CLT panel and insulation slightly increases the mold index value of the cross-section, but it does not have a significant impact on the wall's performance. However, due to the uncertain material properties, the reliability of the calculation model can be questioned, and additional studies may confirm the performance of the structure with a vapor barrier.

Sisukord

Kokkuvõte 5
Summary 6
1. EESSÕNA 9
2. LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU 10
2.1 Lühendid 10
2.2 Tähised 10
3. SISSEJUHATUS 14
3.1 Töö eesmärgid ja sisu 14
3.2 Ristkihtliimpuit ehitusmaterjalina 15
3.2.1 Tootekirjeldus 15
3.2.2 Kasutus 16
3.3 Ristkihtliimpuidu soojus- ja niiskustehnilised omadused 17
3.3.1 Soojuserijuhtivus 17
3.3.2 Niiskuslevi 18
3.4 Soojusisolatsiooni liitsüsteem 19
3.4.1 Kasutatavad soojusisolatsiooni materjalid 20
3.5 Soojusisolatsiooni liitsüsteemi soojus- ja niiskustehnilised probleemid 21
3.5.1 Vihmaleke liitsüsteemis 21
3.5.2 Hallituse kasv 21
4. METOODIKA 23
4.1 Katsemetoodika 23
4.1.1 Katseseinad 24
4.1.2 Mõõtevahendid 33
4.1.3 Katsekeskkond 35
4.2 Arvutusmetoodika 42
4.2.1 Arvutustarkvara 42
4.2.2 Modelleerimise metoodika 47
4.2.3 Hindamiskriteeriumid 49
5. TULEMUSED 53
5.1 Arvutustulemuste võrdlus mõõtetulemustega 53
5.1.1 Referentseina 4.1 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega 53
5.1.2 Katseseina 4.2 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega 64
5.1.3 Katseseina 4.3 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega 66
5.1.4 Katseseina 4.4 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega 68

5.1.5 Katseseina 4.5 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega 70
5.1.6 Vähendatud veeimavuse teguriga krohv 73
5.2 Välisseinte soojus- ja niiskustehniline toimivus 75
5.2.1 Suhteline õhuniiskus ja temperatuur.....75
6. TULEMUSTE ANALÜÜS 80
7. JÄRELDUSED.....83
8. KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 85

1. EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema sõnastati Tallinna Tehnikaülikooli eksperdi Villu Kukk algatusel. Töö koostati ja katseandmed koguti Tallinna Tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituudi uurimisrühma poolt rajatud ristkihtliimpuidust testmajaga ning magistritöö on valminud uurimisrühma laiema uurimisteema ühe osana.

Antud magistritöö keskendub soojusisolatsiooni liitsüsteemiga (ETICS) kaetud CLT paneeli kui välispiirde soojus- ja niiskustehnilise toimivuse hindamisele. Seejuures hinnatakse katsete abil vihmalekke mõju tarindi eri kihtides. Töö peamiseks eesmärgiks oli koostada tarindile võimalikult täpne arvutusmudel. Selleks teostati Tallinna Tehnikaülikooli CLT testmajas mõõtmised ja modelleeriti arvutustarkvaras Delphin 6.1.5 esialgne mudel, mis katseandemete põhjal valideeriti. Töös on välja toodud katsetulemused ning nende võrdlus arvutustulemustega.

Võtmesõnad: CLT, ETICS, vihmaleke, Delphin, magistritöö

2. LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

2.1 Lühendid

CLT (ing. keeles *cross laminated timber*) - ristkihtliimpuit

ETICS (ing. keeles *external thermal insulation composite system*) või **EIFS** (ing. keeles *External Insulation Finishing System*) – soojusisolatsiooni liitsüsteem

PUR (ing. keeles *polyurethane*) - polüuretaan

EPS (ing. keeles *expanded polystyrene*) - vahtpolüstüreen

CHAMPS (ing. keeles *coupled heat, air, moisture, pollutant simulation* või *heat, air, moisture, pollutants and salt transport*) – füüsikaline mudel soojuse, õhu, niiskuse ja saasteainete kombineeritud simulatsiooniks

RH (ing. keeles relative humidity) – suhteline õhuniiskus

MHM (Massiv-Holz-Mauer) – ristkiht-naelpuit paneel, kus on õhusooned sooja- ja helipidavuse tõstmiseks

2.2 Tähised

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

ρ_d – kuiv tihedus [kg/m^3]

a_0 – konstant

a_1 – konstant

M – niiskussisaldus (protsent kuivmassist) [%]

k_0 - konstant

R_T - kogusoojustakistus [m^2*K/W]

R_{si} – sisepinna soojustakistus [m^2*K/W]

R_j – tarindi kihi soojustakistus [m^2*K/W]

R_{se} – välispinna soojustakistus [m^2*K/W]

R – materjalikihi soojustakistus [m²*K/W]

d – materjalikihi paksus [m]

U - soojusläbivus [W/ m²*K]

Δv – siseõhu niiskuslisa [kg/m³]

v_i – siseõhu veeaurusisaldus [kg/m³]

v_e – välisõhu veeaurusisaldus [kg/m³]

G – niiskustootlus ruumis [kg/h]

n – õhuvahetuskordsus [h⁻¹]

V – hoone sisemaht [m³]

I_S – vihmalekke indeks avatud tasasel maastikul (airfield spell index) [l/m²]

v – tunnipõhine keskmine tuulekiirus ([m/s]

r – tunnipõhine vihma kogus [mm]

D – tunnipõhine keskmine tuulesuund põhjasuuna suhtes [◦]

θ – seina orientatsioon põhjasuuna suhtes [◦]

I_{WS} – seina vihmalekke indeks (wall spell index) [l/m²]

I_S – vihmalekke indeks avatud tasasel maastikul [l/m²]

C_R – maastikutüübi indeks (roughness coefficient) [-]

C_T – topograafia indeks (topography coefficient) [-]

O – takistuse tegur (obstruction factor) [-]

W – seina tegur (wall factor) [-]

$\rho_{REV}^{m_{w+v+i}}$ – niiskuse tihedus referentsruumalas (vesi + veeaur + jää) [kg/m³]

$j_{conv}^{m_w}$ – konvektiivne (kapillaarse) vee voog [kg/m²s]

$j_{conv}^{m_v}$ – konvektiivne veeauru voog (õhuvoo olemasolul) [kg/m²s]

$j_{diff}^{m_w}$ – difuusne veeauru voog [kg/m^{2}s]

$\sigma_{REV}^{m_{W+v+i}}$ – niiskuse lisa/kadu referentruumalas [kg/m^3]

$K_l(w)$ – veejuhtivus sõltuvalt veesisaldusest [s]

p_l – vee rõhk [Pa]

ρ_l – vee tihedus [kg/m^3]

g – raskuskiirendus [m/s^2]

$c_g^{m_v}$ – veeauru kontsentratsioon [kg/kg]

p_v – veeauru osarõhk [Pa]

p_a – õhu osarõhk [Pa]

R_a – universaalne gaasikonstant [287.10 J/kgK]

R_v – veeauru gaasikonstant [461.89 J/kgK]

$j_{conv}^{m_g}$ – konvektiivne voog [kg/m^{2}s]

$D_{v,air}(T)$ – veeaurujuhtivus õhus (Schirmer´i võrrand) [m^2/s]

μ – veeauru difusioonitakistustegur [-]

θ_g – maht gaasilises olekus ruumalaühiku kohta [m^3/m^3]

θ_{por} – materjali poorsus [m^3/m^3]

θ_l – maht vedelas olekus ruumalaühiku kohta [m^3/m^3]

$f(\theta_g)$ – funktsioon mahust gaasilises olekus ruumalaühiku kohta [-]

$\rho_{REV}^{m_a}$ – õhu tihedus referentsruumalas [kg/m^3]

$j_{conv}^{m_a}$ – konvektiivne õhuvoog [kg/m^{2}s]

$\sigma_{REV}^{m_a}$ – õhu lisa/kadu referentsruumalas [kg/m^{2}s]

$c_g^{m_a}$ – õhu kontsentratsioon [kg/kg]

p_v – veeauru osarõhk [Pa]

p_a – õhu osarõhk [Pa]

R_a – universaalne gaasikonstant [287.10 J/kgK]

R_v – veeauru gaasikonstant [461.89 J/kgK]

$j_{conv}^{m_g}$ – konvektiivne voog [kg/m^{2}s]

$K_g(w)$ – materjali gaasi läbilaskvus sõltuvalt veesisaldusest [s]

$p_g = p_a + p_v$ – gaasi rõhk [Pa]

$\rho_g = \frac{p_g}{R_a T}$ – gaasi tihedus [kg/m^3]

k_1 – hallituse kasvu intensiivsus [-]

W – puidu liik [0=mänd, 1=kuusk]

SQ – pinnakvaliteet [SQ=0 - saepind, SQ=1 - ahjus kuivatatud]

M – hallitusindeks [-]

t – aeg [h]

k_2 – kasvu aeglustumise tegur hallituse kasvu intensiivsuse jõudmisel maksimumi lähedale [-]

T – temperatuur [°C]

RH – suhteline õhuniiskus [%]

s_d – suhteline difusioonitakistus [m]

A_w – veeimavuse tegur [-]

3. SISSEJUHATUS

3.1 Töö eesmärgid ja sisu

Lõputöö eesmärgiks on uurida soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud ristkihtliimpuitpaneeli kui välisseina soojus- ja niiskustehnilist käitumist ning hinnata vihmalekke mõju seina toimimisele kasutades selleks valideeritud arvutusmudelit. Lõputöö keskendub eelkõige ühele probleemile, mis ilmneb tuulutamata soojusisolatsiooni liitsüsteemi kasutamisel. Nimelt on krohvi pragunemine ja sellest tulenevalt veelekke jõudmine viimistluse tagusesse kihti paratamatu. Kuna väljakuivamine on raskendatud jääb niiskus tarindi vahekihtidesse või imendub soojustusse. Antud töö eesmärk saavutati järgmiste ülesannete lahendamisel:

- Välismõõtmised katsemajas, kus imiteerides vihmaleket seina eri kihtide vahel hinnatakse selle mõju välisseinte mõõdetud soojus- ja niiskustehnilistele parameetritele.

- Arvutustarkvara Delphin 6.1.5 abil koostatakse välisseinte arvutusmudelid ja valideeritaks mõõtetulemuste põhjal, mida võrreldakse arvutustulemustega. Arvutusmudelite koostamisel kasutatakse ainult tarkvara andmebaasis olevaid materjale, mis omadustelt sarnanevad enim välisseintes kasutatavate materjalidega.

- Valideeritud arvutusmudeliga hinnati uuritud soojusisolatsiooni-liitsüsteemiga kaetud välisseinte soojus- ja niiskustehnilist toimivust ning vihmalekke mõju kasutades Eesti hallituse testaasta ilmaandmeid ääretingimustena.

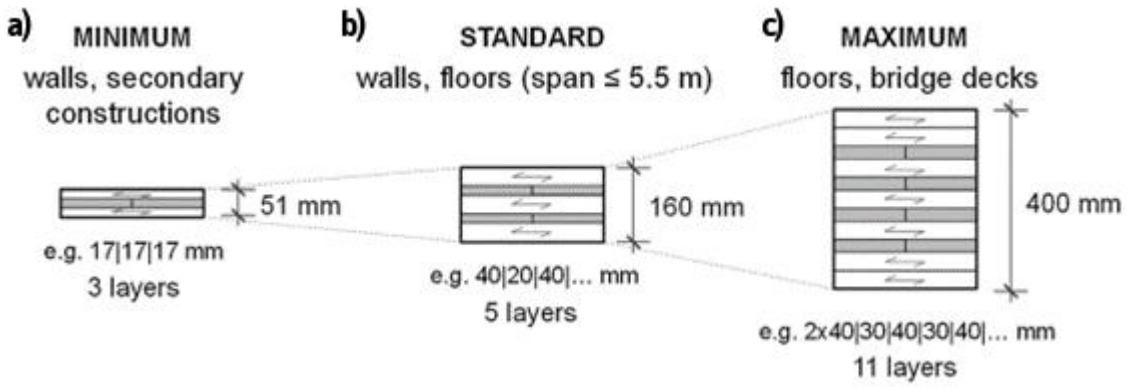
Uurimustöö on jaotatud kolmeks osaks: metoodika, tulemused ja nende analüüs ning järeldus.

Uurimisteema olulisus tuleneb asjaolust, et sarnaseid ristkihtliimpuidul põhinevaid lahendusi on vähe uuritud. Põhjalikult on uuritud tuulutatava fassaadiga massiivpuidust tarindeid, kuid vähesel määral mitte tuulutatavaid. Samal ajal selliste jätkusuutlike ja efektiivsete lahenduste populaarsus aina tõuseb ning edasise kasvu tagamiseks on oluline nende toimivuse hindamine, tõendamine ja puuduste välja toomine, et oleks võimalik lahendusi nende laiemaks kasutuselevõtuks parandada.

3.2 Ristkihtliimpuit ehitusmaterjalina

3.2.1 Tootekirjeldus

Viimase 10 aasta jooksul on puit taas suurendanud oma turuosa võrreldes mineraalsete tahkete ehitusmaterjalide nagu raudbetoon. Seda eriti elamute, büroohoonete ja koolide hulgas, aga ka muudes ehitusvaldkondades. Märkimisväärne on see, et taaskasv on tingitud ka puidu kasutamise taassünnist linnades, kus seda looduslikku ja jätkusuutlikku ehitusmaterjali kardeti sajandeid kasutada selle tuletundlikkuse tõttu. Selle arengu üheks põhjuseks on uuendusliku puittoote, ristkihtliimpuidu, edaspidi CLT (ing. keeles *Cross Laminated Timber*), turule toomine. Ristkihtliimpuit on peaaegu jäik komposiit, plaaditaoline konstrueeritud puittoode, mis reeglina koosneb paaritust arvust kihtidest (tavaliselt kolm, viis või seitse kihti). Ristkihtliimpuitpaneel on standartne toode lähtuvalt standardile EN 16351:2021, mis on valmistatud kõrvuti asetatud laudade kihtidest, mis on paigutatud üksteise suhtes risti 90° nurga all. Ortogonaalne laminaarne struktuur võimaldab seda kasutada kui täissuuruses seina- ja põrandaelementi, samuti lineaarse puitelemendina, mis on võimeline kandma koormusi nii tasapinnaliselt kui ka väljaspool seda. Joonis 3.1 on välja toodud erineva paksusega CLT elemendid ja nende peamine kasutusala. (Brandner et al., 2016)



Joonis 3.1 Näited ristkihtliimpuidu ristlõigetest erineval kasutusotstarbel: a)seinapaneel; b)seina- ja põrandapaneel; c)põranda- ja sillakonstruktsioonid (Brandner et al., 2016)

Iga puidukiht peab olema valmistatud ühe tugevusklassi või ühe individuaalse tugevuse, jäikuse ja tiheduse väärtuste komplektist. (EN 16351:2021, 2021) Hetkel kasutatakse CLT tootmiseks peamiselt okaspuid, enamasti kuuske. Tavaliselt koosneb paneel laudadest paksusega 12 - 45 mm, seejuures lubatud vahemik on 4 – 80 mm. Standardiks on kujunenud kihid paksusega 20, 30 ja 40 mm. Laua laiusel ei ole ülempiiri, kuid CLT-kihtide kokku surumisel tekkivate nihkepingete tõttu on soovitatav

minimaalne laius vähemalt neli laua paksust. Üldiselt kasutatakse CLT jaoks ainult prismaatilise ristlõikega laudu. (Brandner, 2013)

CLT kihtide risti ladumise meetod võimaldab maksimaalselt ära kasutada lähtematerjali omadusi, milleks on puidu kõrge tõmbetugevus pikikiudu ja kõrge survetugevus ristikiudu. Lisaks on välja töötatud kastipõhine CLT-süsteem mitmekesisema ja keerukama struktuurilise eesmärgi saavutamiseks. See vähendab tõhusalt CLT paneeli omakaalu tagades soovitud kandevõime ning olles nii kuluefektiivsem. (Li et al., 2019)

3.2.2 Kasutus

Massiivpuidust paneelid on ehitussektoris muutumas üha populaarsemaks kandekonstruktsiooni elemendina kuna neid iseloomustab tugevus, vastupidavus ja jätkusuutlikkus. Need paneelid on insenertehniliselt projekteeritud olema piisavalt tugevad, et toetada terve hoone kaalu. Neid saab kasutada betooni ja terase asemel, mis on kallimad ja vähem jätkusuutlikud ehitusmaterjalid. Massiivpuidust paneelide tootmisprotsess nõuab vähem energiat ja tekitab vähem kasvuhoonegaase kui betooni ja terase tootmine. Eeltoodetud puitpaneelide kasutamine tagab tõhusa ehituse ja renoveerimise protsessi ning võimaldab kasutusea lõppedes demonteerida ja materjalidele uus otstarve anda. See aitab kaasa jäätmete vähendamisele ja nendes puittoodetes talletatud süsiniku eluea pikenemisele. (*Mass Timber Construction | Laminated Timber | Think Wood*, n.d.)

CLT on oma mitmekülgsuse tõttu väga hästi sobilik toode ka mitmekorruseliste hoonete jaoks. Pikkustega kuni 16 meetrit ja mehhaaniliste vuukide või liimühendustega pikendamise võimalusega, olenevalt tootjast laiusega kuni 2,5 meetrit ja paksustega kuni 500 mm, võib tänapäeval turult leida peaaegu iga vaja mineva kuju. Arengud käivad endiselt kiiresti ning uued võimalused ja uued rakendused pole kaugeltki ammendatud. Üheks selliseks uueks võimaluseks on väga kõrgetes hoonetes CLT elementide kasutamine kombinatsioonis betoonsüdamikuga. CLT on juba osutunud väga tõhusaks kuni 10-korruselistes mitmekorruselistes hoonetes. (Van De Kuilen et al., 2011)

USA standard IBC (ing. keeles *International Building Code*) võttis 2021. aastal kasutusele kolm uut konstruktsioonitüüpi tulekindla massiivpuitehitiste jaoks. Puitrajatiste kõrgus oli seni piiratud 6 korrusega. Muudatused tõstsid massiivpuidust rajatavate hoonete võimaliku kõrguse 18 korruseni. Kasutusele võetud uued konstruktsioonitüübid:

- Tüüp IV-A – maksimaalselt 18 korrust, mittesüttiva kaitsega kõikidel massiivpuitelementidel.
- Tüüp IV-B – maksimaalselt 12 korrust, lubatud on piiratud pindala katmata massiivpuidust seinu ja lagesid.
- Tüüp IV-C – maksimaalselt 9 korrust, kogu massiivpuit on lubatud eksponeerida (mõnede eranditega, nagu šahtid) ja projekteeritud tulepüsivusega 2 tundi.

(*2021 International Building Code (IBC)*, n.d.)

Massiivpuidust paneelide kasutamine muutub ka esteetiliselt üha populaarsemaks. Puidu loomulik ilu võib luua sooja ja kutsuva sisekujunduse, mis on nii visuaalselt atraktiivne kui ka funktsionaalne. Kuigi massiivpuidust paneelide kasutamine on ehitussektoris endiselt suhteliselt uus, oodatakse tulevikus selle populaarsuse kasvu. Paljud arhitektid, insenerid ja ehitusprofessionaalid tunnistavad massiivpuidust paneelide kasutamise eeliseid ja kaasavad need oma hoonekujundustesse. Suured avatud ruumid, nagu areenid, koolid ja kontoriruumid, mis nõuavad kõrgeid seinu ja minimaalselt tugesid, saab probleemideta projekteerida puittoodetega, nagu liimpuit, mida saab valmistada saavutamaks sildeid üle 30 meetri ja seinteks kõrgusega 6 meetrit. (*Mass Timber - American Wood Council*, n.d.)

3.3 Ristkihtliimpuidu soojus- ja niiskustehnilised omadused

3.3.1 Soojuserijuhtivus

Soojuslikult käitub puit anisotroopselt, näiteks piki kiudu on puidu soojuserijuhtivus umbes kaks korda suurem kui risti kiudu, samas tangentsiaalse ja radiaalse suuna puhul võib saada sarnaseid väärtusi. Soojuserijuhtivus sõltub suuresti puidu niiskusesisaldusest ja tihedusest, mida iseloomustatakse lineaarse seosega (3.1) (Asdrubali et al., 2017a):

$$\lambda = d(a_0 + a_1 M) + k_0 \tag{3.1}$$

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

ρ_d – kuiv tihedus [kg/m^3]

a_0 – konstant

a_1 – konstant

M – niiskussisaldus (protsent kuivmassist) [%]

k_0 – konstant

Puidul on madal soojuserijuhtivus võrreldes teiste ehitusmaterjalidega ja seda saab kasutada ka soojustuspaneelide valmistamiseks. See omadus võib aidata vähendada ehitise energiakasutust, vähendades soojuskadusid külma ilmaga ja soojuskasvu kuumal ilmal. Klassikaliste müürimaterjalide ja betooni asemel CLT paneelide kasutamine koos traditsiooniliste ja uuenduslike soojusisolatsioonimaterjalidega suurendab seina soojustakistust. Võimalik on saavutada kõrgeid soojustakistuse väärtusi, kõrgemaid kui R = 3,5 m^{2}K/W (U-väärtus alla 0,29 W/m^{2}K) ja seda väikeste paksuste juures. (Asdrubali et al., 2017a)

3.3.2 Niiskuslevi

Puit on hügroskoopne materjal, millel on võime imeda või hüljata vett vastavalt ümbritseva õhu temperatuurile ja suhtelisele niiskusele kuni saavutatakse niiskustasakaal. Niiskuse liikumine läbi materjali liigitatakse kolme erinevasse etappi (EVS-EN ISO 15148:2003, 2003):

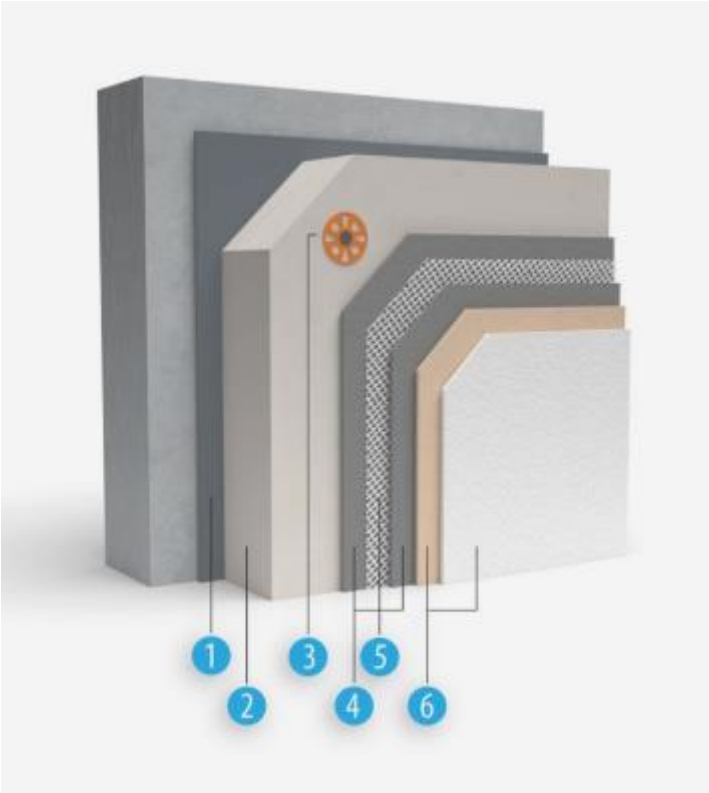
- Madala niiskustaseme juures toimub niiskuse ülekandumine ainut veeauru kujul.
- Suurema suhtelise niiskuse juures kuni 95% kandub niiskus üle veeauru ja kapillaarvee liikumisel läbi niiske materjali.
- Suhtelise niiskuse juures üle 95% mõjutab olukorda kondensatsioon ja domineerib niiskuse ülekandumine vedela vee näol.

Puit on anisotroopne ja heterogeenne materjal ja seetõttu oleneb niiskuse liikumine puidus kokkupuutepiirkonnast. Niiskus liigub puidu pikisuunas kiiremini kui tangentsiaal- ja radiaalsuunas. Puitu imendub vesi piki kiudu umbes 10 korda kiiremini kui ristikiudu. Sellest lähtuvalt sõltub niiskuse ülekandumine hoones materjali paigaldamise orientatsioonist. CLT puutub kokku atmosfääri ja teiste materjalidega tangentsiaal- ja radiaalsuunas ning paneele paigaldades ei tohiks puidu piki kiud jääda

keskkonnale avatuks. Paneelil on sellisel juhul suhteliselt madal niiskuse ülekandekiirus, mis tähendab, et see on vähem vastuvõtlik niiskusega seotud probleemidele, nagu paistetus, kõverdumine ja mädanik. Suurim mõju võib leida aset CLT paneelide transpordil või ladustamisel, seetõttu on oluline elementide kaitsmine. (Alsayegh, 2012)

3.4 Soojusisolatsiooni liitsüsteem

Soojusisolatsiooni liitsüsteemi ehk ETICS-it (ing. keeles *External Thermal Insulation Composite System*) saab kasutada nii uute kui ka olemasolevate hoonete jätkusuutlikkuse ja energiatõhususe parandamiseks. ETICS kujutab endas ehitustooteid, mis koosnevad eeltoodetud komponentidest, mis kantakse ehitusplatsil otse fassaadile, müüritisele või betoonist täisseinale. Süsteem koosneb soojusisolatsioonimaterjalist, mis kantakse välisseinale liimi ja/või mehaaniliste kinnitustega. Seejärel kantakse isolatsiooni peale armeerimisvõrguga krohvisüsteem. Joonis 3.2 on toodud tüüpiline soojusisolatsiooni liitsüsteemi läbilõige. (European Association for ETICS (EAE), 2021)



Joonis 3.2 Soojusisolatsiooni liitsüsteemi läbilõige: 1)liim; 2)soojusisolatsiooniplaat; 3)mehaanilised kinnitusdetailid; 4)krohvi aluskiht; 5)tugevdus; 6)viimistluskiht

3.4.1 Kasutatavad soojusisolatsiooni materjalid

Üks suurim erinevus erinevate ETICS lahenduste vahel on soojusisolatsioonimaterjali valik. Enimkasutatav isolatsioonimaterjal on odava hinna ja kinnitust leidnud eeliste tõttu vahtpolüstüreen (EPS). Siiski kasutatakse ka muid soojusisolatsioonimaterjale, nagu mineraalvill või paisutatud korgi aglomeraat plaadid. Olukordades, kus võimalik seina paksus on piiratud, on kasutama hakatud ka vaakumisolatsioonipaneele. See kujutab endas jäiga südamikuga gaasikindlat korpust, millest on õhk välja imetud. (Gonçalves et al., 2021)

Selle töö käigus katsetatud liitsüsteemis kasutati soojustusena puitkiudplaati Steico Protect. Tegemist on välisfassaadi soojusisolatsiooniga, mida saab kasutada puit- ja müürikonstruktsioonide katmiseks. Plaadil on difusiooni, soojust ja heli isoleerivad omadused ning seda on võimalik krohvida. See koosneb puitkiududest, alumiiniumsulfaadist ja parafiinist ning seda saab toota kahe meetodi abil - märja ja kuiva meetodiga.

Märja meetodi korral jahvatatakse kõigepealt koostisosad, seejärel segatakse need massiks, mis koosneb 98% veest. Ajutise ladustamise järel kasutatakse vormimismasinat, et anda sellele esialgne kuju. Vesi eemaldatakse mehaaniliselt, kiud lähevad kokku ja mass kuivatatakse kuivatuskanalites temperatuuril vahemikus 160-220 °C. Sideaine lisamine pole vajalik, kuna puit sisaldab leeliselist ligniiti, mis muutub kuumutamisel vedelaks ja jahutamisel seob puiduosakesed omavahel. Erandjuhtudel saavutamaks suurenenud tugevuse või veekindlamad omadused lisatakse massile vaiku või asfalti. Seejärel lõigatakse plaadid, asetatakse kuhjadesse ja pakitakse, paksemate plaatide saamiseks kleebitakse nad kihiti omavahel. Kuivmeetodi korral kuivatatakse kiud kohe pärast kuivatuskanalist väljaviimist uuesti ning seejärel segatakse need polüuretaan (PUR) vaiguga. Painduvate isolatsiooniplaatide tootmiseks võidakse puitkiududele lisada sünteetilisi tekstiilkiude või maisitärklist. Lõpuks valatakse need nõutavasse paksusesse, pressitakse ning tugevdatakse auru ja õhu abil enne lõikamist ja pakendamist. (Horvathova, 2021)

Võimalik on kasutada ka toodet Steico Black. See erineb selle poolest, et seda on värvitud bituumeniga, et luua ilmastikutingimuste suhtes vastupidav pind. See sobib tuulutusega fassaadidele. Komposiit koosneb puitkiust, alumiiniumsulfaadist ja bituumenist. (Horvathova, 2021)

3.5 Soojusisolatsiooni liitsüsteemi soojus- ja niiskustehnilised probleemid

3.5.1 Vihmaleke liitsüsteemis

Vihma ajal hakkab ETICS-i välispinnale sattunud vesi peaaegu kohe sealt viimistluskihi madala kapillaarse imendumisteguri tõttu (<0.1 kg/m^2 tunni möödudes) maha jooksma. Vee tungimine läbi äsja paigaldatud ETICS-i pinna on väga ebatõenäoline, aga peaaegu võimatu on krohvikihi pragunemise vältimine hügriliste pingete tõttu, vananemisest või ehitise liikumisest. Tekkinud pragude kaudu saab vesi liitsüsteemi imbuda. Kui ETICS paigaldatakse müüritisele, võib sein sisse imbunud vihmavee endasse imeda ning sellest sise- või välispinnal difusiooni ja aurustumise teel vabaneda. Puitkarkasskonstruktsioonid on seevastu märgumise vastu palju tundlikumad ja konstruktsiooni imbunud vesi võib põhjustada tõsiseid probleeme, nagu näiteks puidu mädanemine. (Van Linden & Van Den Bossche, 2022)

Ettekujutuse krohvipragude kaudu staatilise vee läbitungimisest annab Ullet´i ja Brown´i katse ETICS-i prooviga nii horisontaalse defektiga, imiteerimaks pragu, kui ka ilma selleta. Koguti läbi proovi imbunud vesi, mis jõudis EPS-i (ing. keeles *expanded polystyrene,* vahtpolüstüreen) siseküljele ja voolas mööda EPS-is olevaid äravoolukanaleid (25×6 mm) ja/või voolas läbi proovi põhjas olevate ventilatsiooniavade. Ilma rõhuerinevuseta oli infiltreeruva vee kogus defektiga ja defektita proovi puhul sama (0,06%). Infiltreeruva vee kogus suurenes rõhuerinevuse suurenedes. Rõhuvahe 500 Pa juures oli defektiga proovikehast läbi imbunud vee hulk (1,15%) enam kui kaks korda suurem kui läbi defektita proovikeha imbunud vee hulk (0,40%). Mõõtmised teostati ka tsüklilistes katsetes keskmise rõhuga 300 Pa ja amplituudiga 200 Pa avatud õhutusavadega ETICS-is. Ventilatsiooniavad ETICS-is, väikesed õhuõõnsused EPS-i soontes ja õhutõke siseküljel tagasid madalama rõhuerinevuse, mille tulemuseks oli väiksem infiltratsioonimäär. Ainult juhul, kui õhutõkkes olid õhulekkeavad, näitasid mõõtmised infiltratsioonimäärade väikest kasvu. (Van Linden & Van Den Bossche, 2022)(Ullet & Brown, 1996)

3.5.2 Hallituse kasv

ETICS puutub otseselt kokku ilmastikumõjude ja inimtekkeliste teguritega. Sel põhjusel on bioloogiliste organismide kasv tavapärases ETICS-is üks sagedasemaid mureküsimusi. Kuigi esteetilised anomaaliad ei pruugi mõjutada süsteemi soojustõhusust, võib selline probleem kaasa aidata lahenduse usaldusväärsuse vähenemisele. Varasemad uuringud on näidanud, et bioloogilist kasvu mõjutavad tugevalt pinna omadused, nagu pH, poorsus ja viimistluskihi karedus, samuti

õhutemperatuur, suhteline niiskus ja seina orientatsioon. Hallituse kasv on seotud pinna niiskusesisalduse kõrge tasemega, mis tuleneb välispinna kondensatsiooni, kaldvihma, kuivamisprotsessi ja krohvi omaduste koosmõjust.

Lisaks märgumisele kaldvihmast tekib välispinna kondensatsioon fassaadi ja atmosfääri vahelise pikalainelise kiirguse vahetuse tõttu, mille tulemuseks on netosoojusvoog taevasse, mis viib madalate temperatuurideni. Kondensatsioon tekib siis, kui seina välispinna temperatuur langeb alla välisõhu kastepunkti. Seega seina värvusel on suur mõju pinna niiskussisaldusele. Pikalainelisest kiirgusest tingitud pinnakondensatsiooni koguse kvantifitseerimist peetakse heaks kriteeriumiks mikrobioloogilise kasvuriski hindamisel, kuna vee olemasolu materjalis peetakse oluliseks aspektiks hallitusseente tekkeks seinte pinnal.

ETICS-is võib mikrobioloogilist kasvuriski lisaks viimistluskihi omadustele oluliselt mõjutada ka isolatsioonimaterjali tüüp. Madala soojusisolatsioonitasemega hoonete puhul on pinna kondensatsiooni oht väiksem. Seina orientatsiooni tõttu varieerub ka hallitusoht maja erinevatel seinadel, sest välispinna suund määrab kuivamisaja pikkuse. Kui pinna kokkupuude päikesekiirgusega on lühike, suureneb ka oht mikrobioloogilisele kasvule. (Gonçalves et al., 2021)

4. METOODIKA

4.1 Katsemetoodika

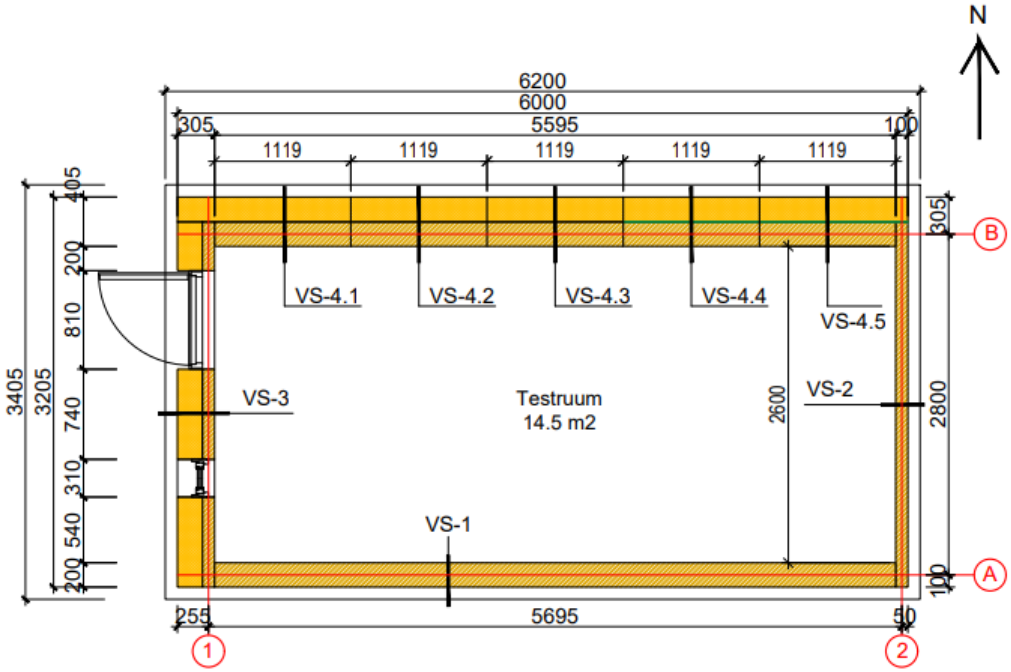
Lõputöö raames modelleeritud arvutusmudeli valideerimiseks teostati mõõtmised Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse tänav 3 ristkihtliimpuidust testmajas, mis on toodud Joonis 4.1 ja Joonis 4.2. Anduritega mõõdeti hoone sise- ja väliskliimat. Simuleeriti kaldvihmaleket soojusisolatsiooni liitsüsteemi erinevates kihtides ning mõõdeti temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust, et leida lekke mõju antud suurustele ja seina niiskustehnilisele toimivusele. Mõõteperioodi pikkus oli 01. jaanuar – 05. mai 2023, katseperiood vihmalekke imiteerimisega leidis aset 29. märts – 05. mai.

Joonis 4.1 Ristkihtliimpuidu testmaja enne krohvimist

Joonis 4.2 Ristkihtliimpuidu testmaja

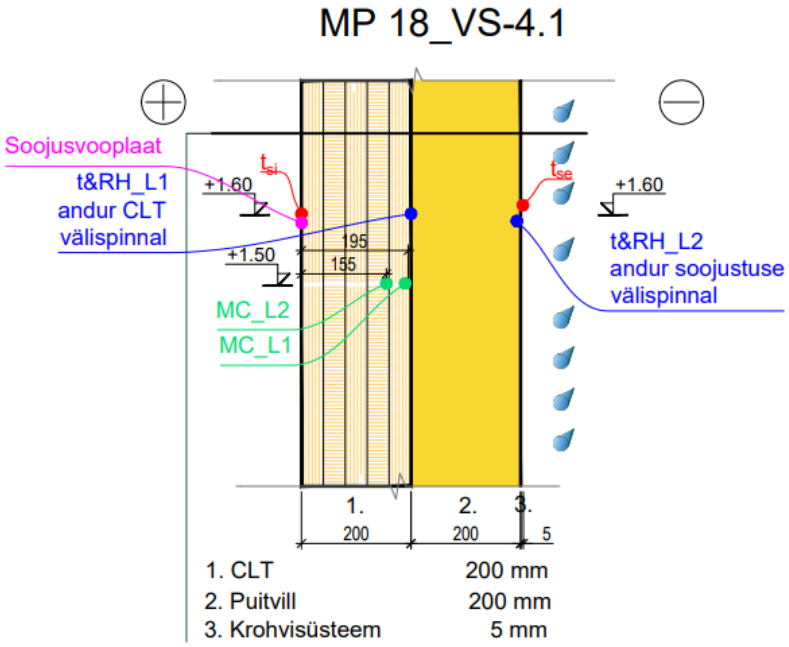
4.1.1 Katseseinad

Testmajal on neli erineva läbilõikega välisseina. Antud lõputöö raames teostati mõõtmised testmaja põhjapoolses seinas, mis kujutab endas soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud ristkihtliimpuitpaneeli. See koosneb ristkihtliimpuitpaneelist, puitkiudplaadist ja krohvikihist. Välissein on jaotatud viieks osaks (VS-4.1…VS-4.5), mille hulgas on referentssein ja kaldvihmalekkega seinad, seejuures osa auru- ja õhutõkkega, teised ilma. Seina jaotus on näidatud Joonis 4.3.



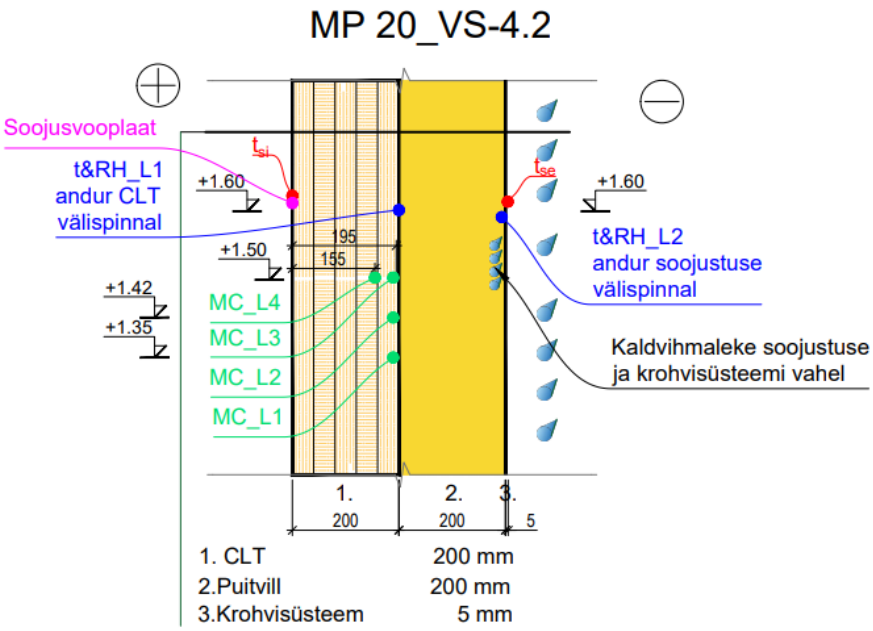
Joonis 4.3 Ristkihtliimpuit testmaja plaan

VS-4.1 on referentssein ilma auru- ja õhutõkketa. Seina lõige on toodud Joonis 4.4.



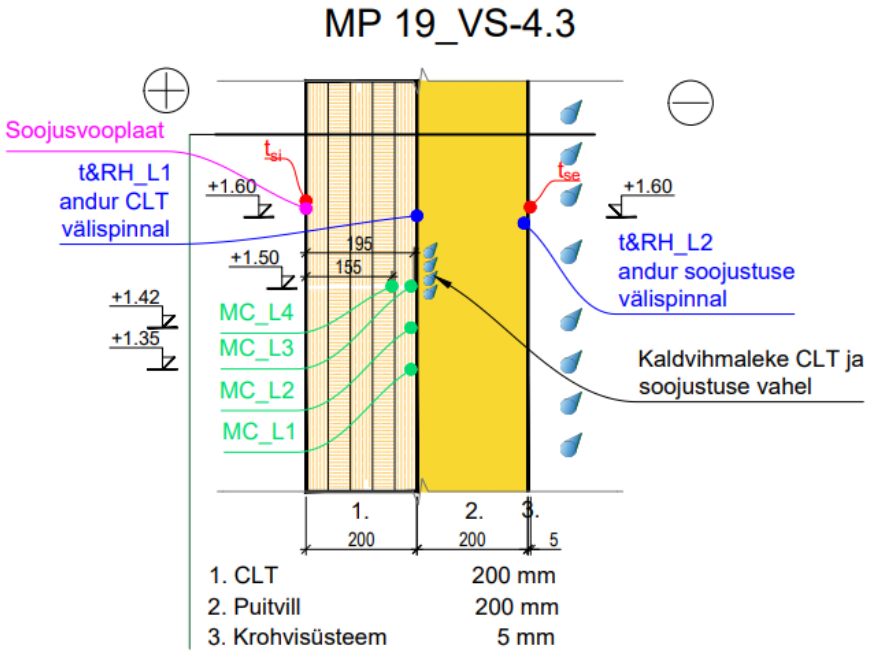
Joonis 4.4 VS-4.1 lõige

VS-4.2 on sama ristlõikega nagu VS-4.1, kuid ristkihtliimpuitpaneeli ja puitvilla plaadi vahele on simuleeritud kaldvihmaleke. Seina ristlõige on toodud Joonis 4.5.



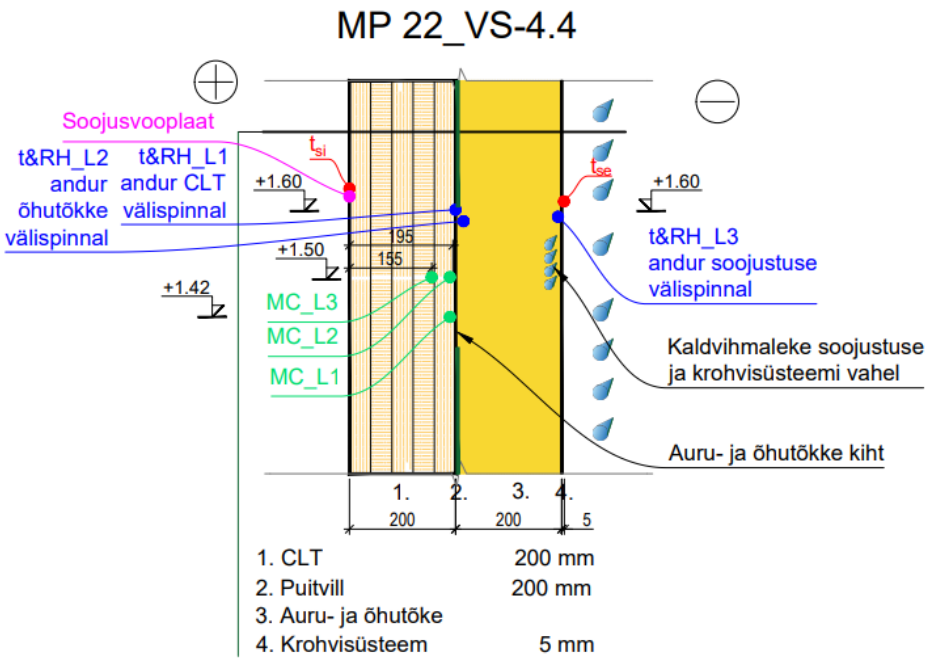
Joonis 4.5 VS-4.2 lõige

VS-4.3 on sama ristlõikega nagu VS-4.1, kuid puitvilla plaadi ja krohvi vahele on simuleeritud kaldvihmaleke. Seina ristlõige on toodud Joonis 4.6.



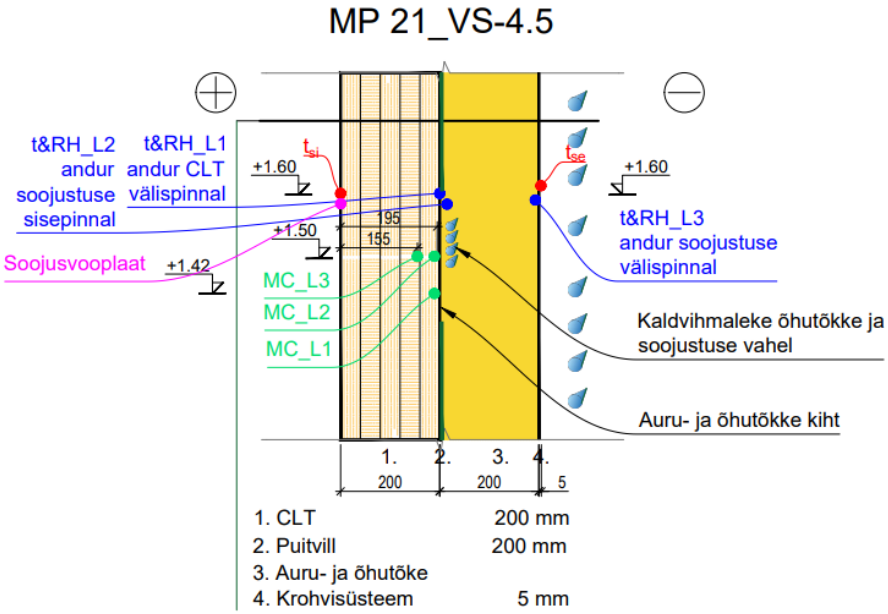
Joonis 4.6 VS-4.3 lõige

VS-4.4 korral on ristkihtliimpuitpaneeli ja puitvilla vahel auru- ja õhutõke. Lisaks on auru- ja õhutõkke kõrvale soojustuse poole simuleeritud kaldvihmaleke. Seina lõige on toodud Joonis 4.7.



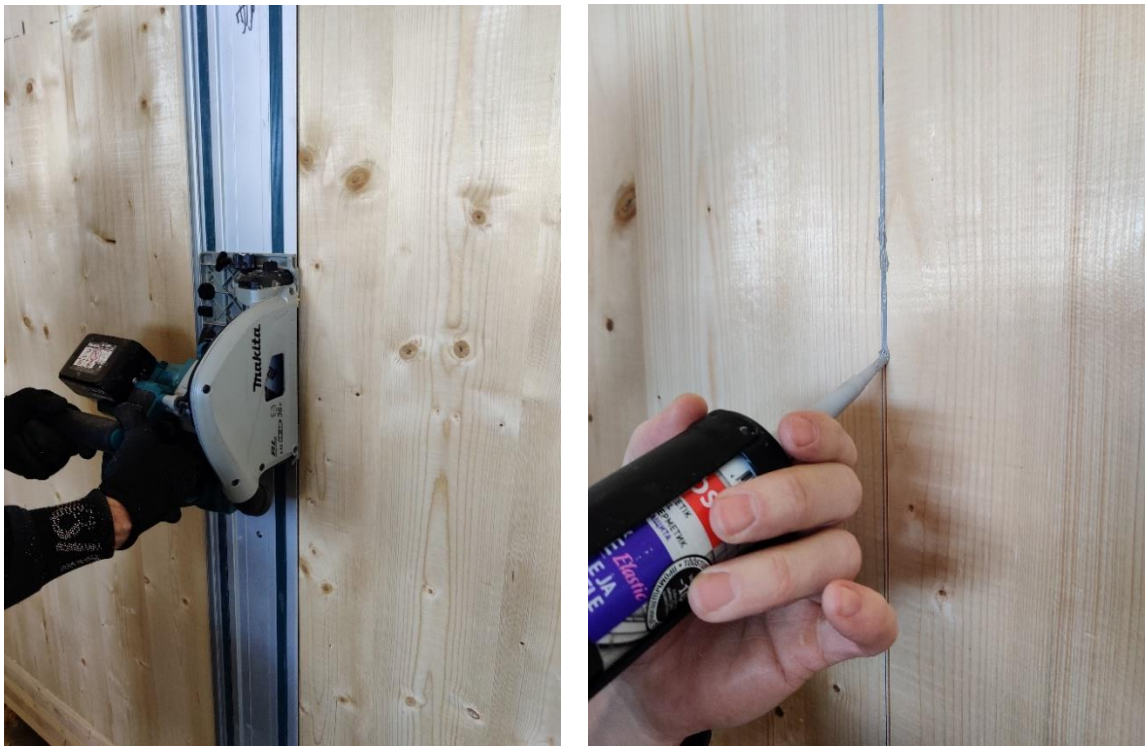
Joonis 4.7 VS-4.4 lõige

VS-4.5 ristlõige on sama, mis VS-4.4. Antud juhul on kaldvihmaleke simuleeritud krohvikihi ja soojustuse vahele. Seina lõige on toodud Joonis 4.8.



Joonis 4.8 VS-4.5 lõige

Välisseina erinevad sektsioonid eraldati üksteisest, et tõkestada niiskuse levikut eri osade vahel. CLT paneeli lõigati vuuk, mis täideti veekindla mastiksiga (Joonis 4.9). Lisaks paigaldati soojustuse kihti vuugi kohale EPS-i (ing. keeles *expanded polystyrene*, vahtpolüstüreen) riba (Joonis 4.10).



Joonis 4.9 Erinevate sektsioonide vahele vuukide saagimine ja nende täitmine mastiksiga

Joonis 4.10 Erinevad sektsioonid eraldati üksteisest EPS-i ribaga

Liitsüsteemis kasutati soojustuseks puitkiudplaati Steico Protect M Dry paksusega 200 mm. Soojustusplaat kaeti kahe kihi krohviga Knauf SM700 Pro. Auru- ja õhutõkkena on kasutatud toodet Solitex Adhero 1000. Toodete omadused on toodud Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Liitsüsteemi toodete ja CLT tehnilised andmed (STEICO, 2022) (Knauf, 2015) (Pro Clima, 2023)

Parameeter	**Steico Protect M Dry**	**Knauf SM700**	**Solitex Adhero 1000**	**CLT paneel (kuiv materjal)**
Paksus [mm]	200	-	0.55	200
Deklareeritud soojuserijuhtivus λ [W/(m*K)]	0.040	≤0.82, P=50% ≤0.89, P=90%	0.04	0.102
Tihedus ρ [kg/m^3]	~140	-	-	423
Veeauru difusiooni-takistustegur μ	3	≤25	545	-

Deklareeritud soojuserijuhtivus on ehitusmaterjali- või toote soojuserijuhtivuse ooteväärtus, mis on hinnanguline, põhinedes temperatuuri ja niiskuse referentstingimustel saadud mõõtmistulemustel, on antud kindlaksmääratud kvantiili ja usaldusnivoo kohta ning vastab normaaltingimustes põhjendatud oodatavale elueale. (EVS-EN ISO 10456:2008, 2008) See väljendab soojuse hulka vattides, mis läbib 1 meetri paksust ja 1 m^2 pinnaga materjalikihi, kui temperatuuride vahe vastastikuste pindade vahel on 1 K.

Veeauru difusioonitakistustegur (ing. keeles *water vapour resistance factor*) näitab, kui palju suurem on materjali takistus veeauru läbilaskmisel võrreldes sama paksu paigal seisva õhukihiga samal temperatuuril. (EVS-EN ISO 12572:2016, 2016)

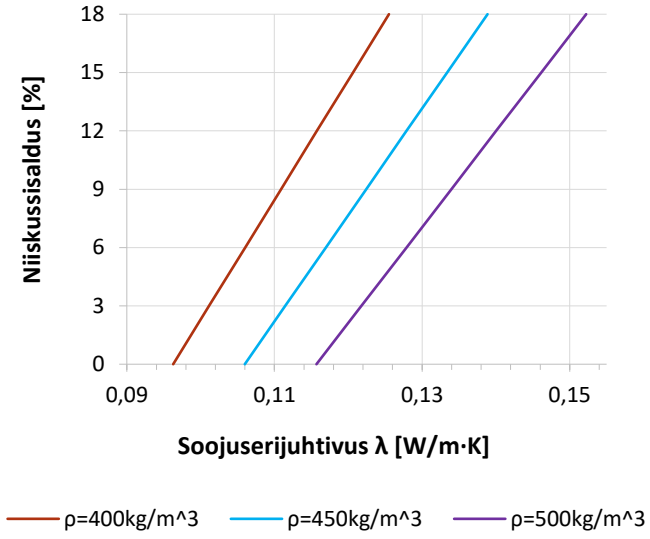
4.1.1.1 Ristkihtliipuitpaneeli omadused

CLT paneeli omaduste määramiseks kasutati katsemaja ehitusel võetud katsekeha. Katsekeha mõõdeti ning kaaluti pärast kuivatuskapis niiskuse eemaldamist vastavalt standardile EVS-EN 13183-1:2002. Saadud tulemustega sai määrata CLT tiheduse,

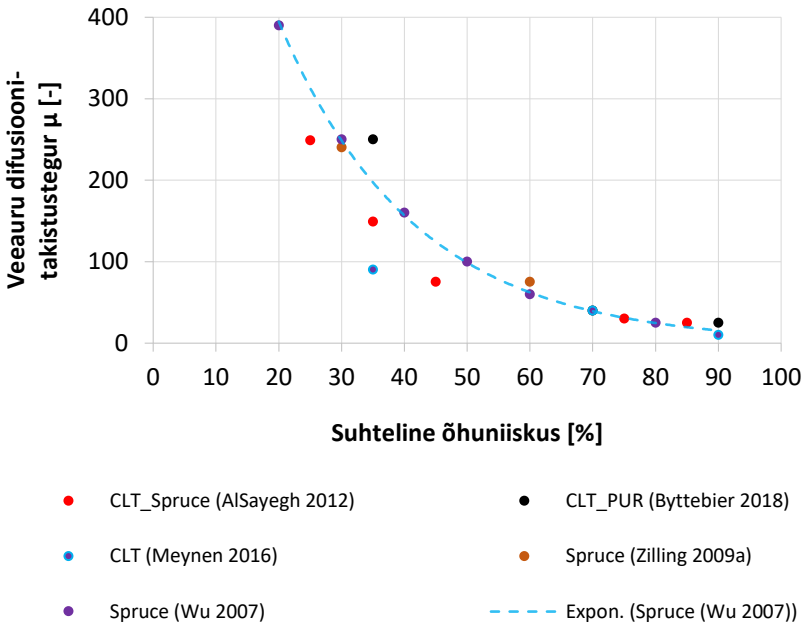
mille abil omakorda määrata materjali soojuserijuhtivuse. Kuiva CLT paneeli väärtused on toodud Tabel 4.1.

CLT niiskus- ja soojustehnilised omadused sõltuvad suuresti niiskuslikest tingimustest. Puidu soojuserijuhtivus sõltub lineaarselt materjali niiskussisaldusest ja tihedusest. (Joonis 4.11) (TenWolde et al., 1988) Puidu soojuserijuhtivus sõltub ka puidukiu suunast, ristikiudu on see kaks korda madalam kui pikikiudu. (Asdrubali et al., 2017)

CLT veeaurutakistuse laborimõõtmisi on kirjeldatud kui isotermilist protsessi, kus takistus on pöördvõrdeline suhtelise niiskusega. (Joonis 4.12) (Alsayegh, 2012; Byttebier, 2018; Meynen, 2016; Wu, 2007; Zilling, 2009) Puidu isotermiline veeauru takistus hõlmab endas veeauru difusiooni ja veejuhtivust. Suhtelise niiskuse juures kuni 60 % moodustab kogu niiskuse transpordist enamuse veeauru difusioon. Sellest kõrgema suhtelise niiskuse juures domineerib kapillaarse kondenseerumise tõttu veejuhtivus. (Hagentoft, 2001; Kukk, Kers, et al., 2022; Vinha et al., 2005)



Joonis 4.11 Soojuserijuhtivuse sõltuvus niiskussisaldusest puidu ristikiu suhtes (TenWolde et al., 1988)



Joonis 4.12 Puidu veeauru difusioonitakistusteguri sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest (Alsayegh, 2012; Byttebier, 2018; Meynen, 2016; Wu, 2007; Zilling, 2009)

4.1.1.2 Tarindi soojusläbivus

Antud lõputöö raames katsetes kasutatud CLT testmaja põhjapoolse välisseina soojusläbivus arvutati standardi EVS-EN ISO 13788:2012 alusel. Tarindi kogusoojustakistus arvutati valemiga (4.1).

$$R_T = R_{si} + \sum_{j=1}^{N} R_j + R_{se} \tag{4.1}$$

,kus R_T – kogusoojustakistus [m²*K/W]

R_{si} – sisepinna soojustakistus [m²*K/W]

R_j – tarindi kihi soojustakistus [m²*K/W]

R_{se} – välispinna soojustakistus [m²*K/W]

Välispinna soojustakistuse väärtuseks tuleb võtta $R_{se} = 0{,}04\ m^2 * K/W$. Sisepinna soojustakistus on $R_{si} = 0{,}13\ m^2 * K/W$, kuna soojusvoo suund on horisontaalne. Soojuslikult homogeense materjalikihi soojustakistus arvutatakse valemiga (4.2).

$$R = \frac{d}{\lambda} \tag{4.2}$$

,kus R – materjalikihi soojustakistus [m²*K/W]

d – materjalikihi paksus [m]

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

Välisseinas kasutatud materjalide deklareeritud soojuserijuhtivused on toodu peatükis 4.1.1 Tabel 4.1. CLT paneeli keskmine niiskussisaldus oli katseperioodil 8%, seega võime antud materjalikihi soojuserijuhtivuseks võtta $\lambda = 0{,}116\ \mathrm{W/(m*K)}$. Keskmine suhteline õhuniiskus sisekeskkonnas oli 51%, mis annab CLT paneeli veeauru difusioonitakistusteguriks $\mu = 98$. Nende andmete põhjal saame välisseina kogusoojustakistuseks $R_T = 6{,}914\ m^2 * \mathrm{K/W}$. Piirde soojusläbivus on kogusoojustakistuse pöördväärtus (4.3), seega saame välisseina soojusläbivuseks $U = 0{,}145\ W/m^2 * \mathrm{K}$.

$$U = \frac{1}{R_T} \tag{4.3}$$

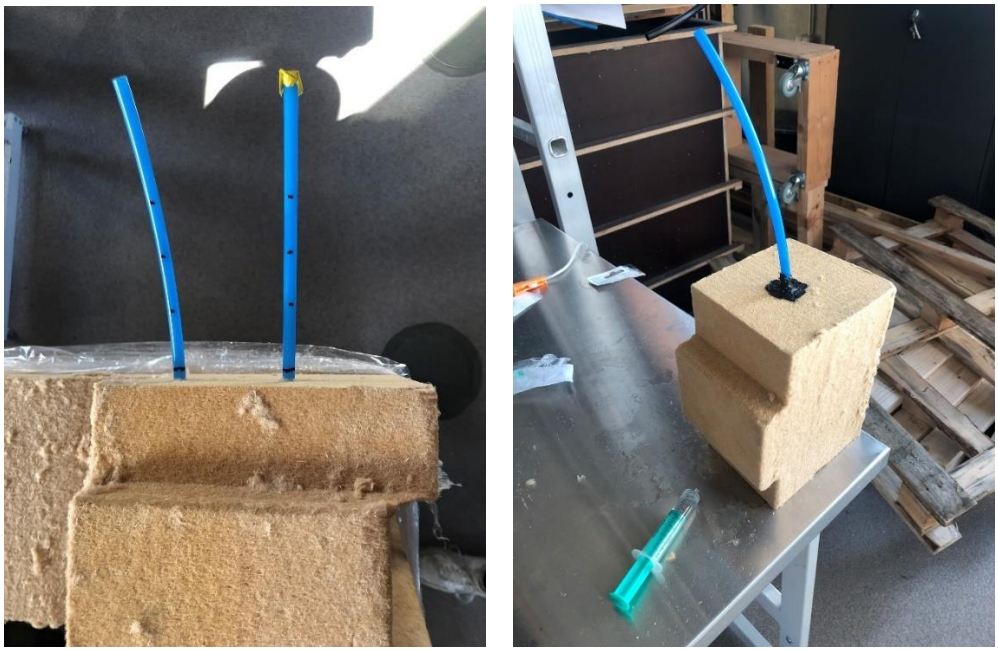
,kus U – tarindi soojusläbivus [W/ m²*K]

R_T – kogusoojustakistus [m²*K/W]

4.1.1.3 Soojustuse veeimavus

Puidupõhistel soojusisolatsioonimaterjalidel on huvitavad hügroskoopsed omadused, sest nende niiskusmahtuvus on suurem kui tavapärastel soojustusmaterjalidel nagu mineraalvill. Puitkiudisolatsiooniga seintel võib olla sama kõrge niiskustaseme oht kui mineraalvillast isolatsiooniga seintel. Samal ajal puitkiudisolatsioon imab kondensatsiooni ja vett, mineraalvill aga mitte. Seega võrreldes mineraalvillast isolatsiooniga on puitkiudisolatsiooni eeliseks niiskuse jaotamine suurema piirkonna peale. Tänu sellele omadusele võib loodusliku ja väga hügroskoopse isolatsioonimaterjali kasutamisel olla positiivne mõju puidupõhiste hoonekonstruktsioonide niiskustingimustele. Lisaks näitavad uuringud, et kõrge soojustakistusega välisõhutõkke kasutamine toob kaasa üldiselt madalama niiskustaseme seinakonstruktsioonis, mida saab pidada hallituse kasvu riski vähendavaks teguriks. (Bunkholt et al., 2021)

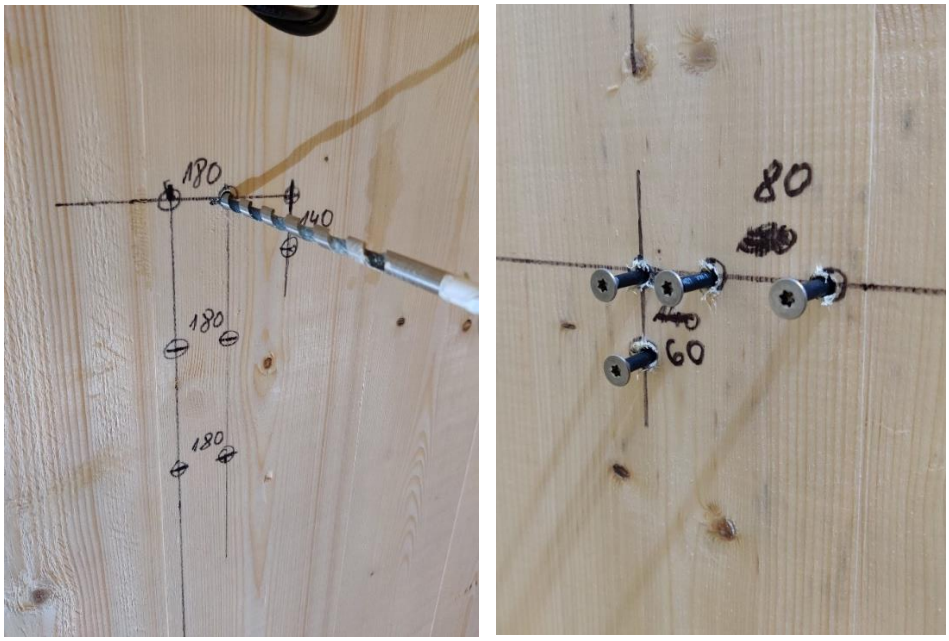
Enne vihmalekke simuleerimist teostati katsed puitkiudplaadiga veeimavuse hindamiseks antud tingimustes. (Joonis 4.13) Tulemused näitasid, et materjali vee vastuvõtmisvõime on väike ja mõne milliliitri vee imendumiseks kulub mitu päeva.



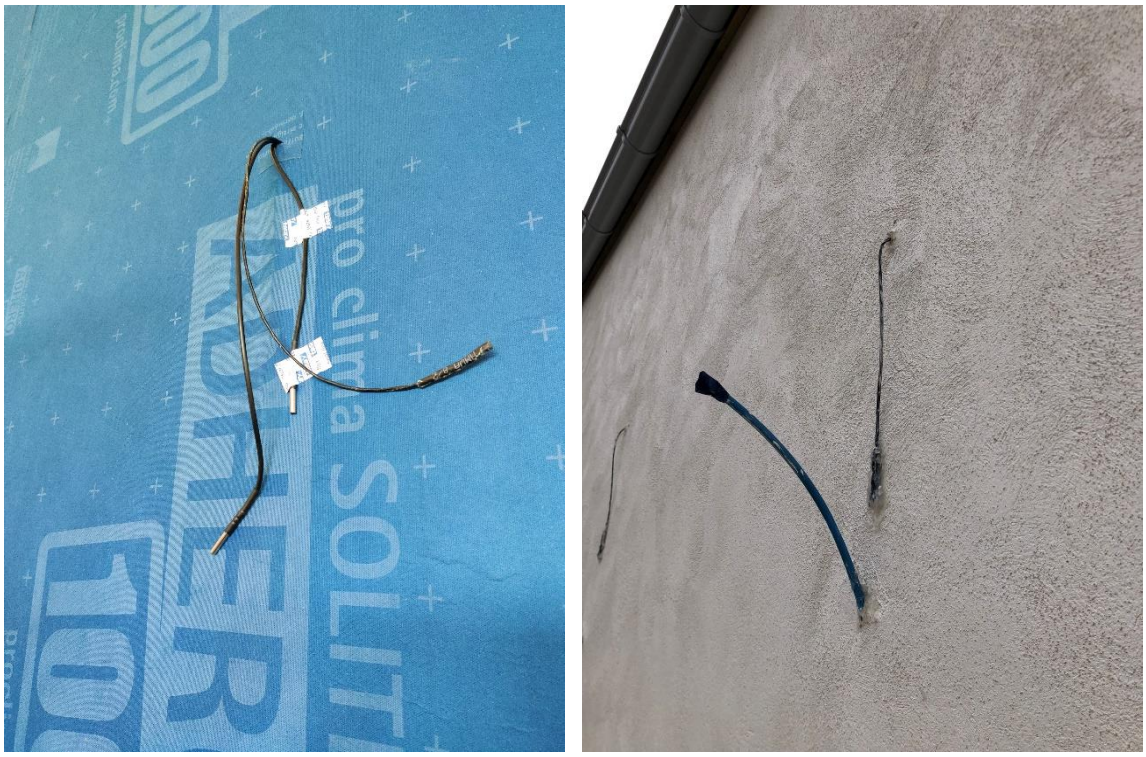
Joonis 4.13 Katsed puitkiudplaadi Steico Protect M Dry veeimavuse hindamiseks

4.1.2 Mõõtevahendid

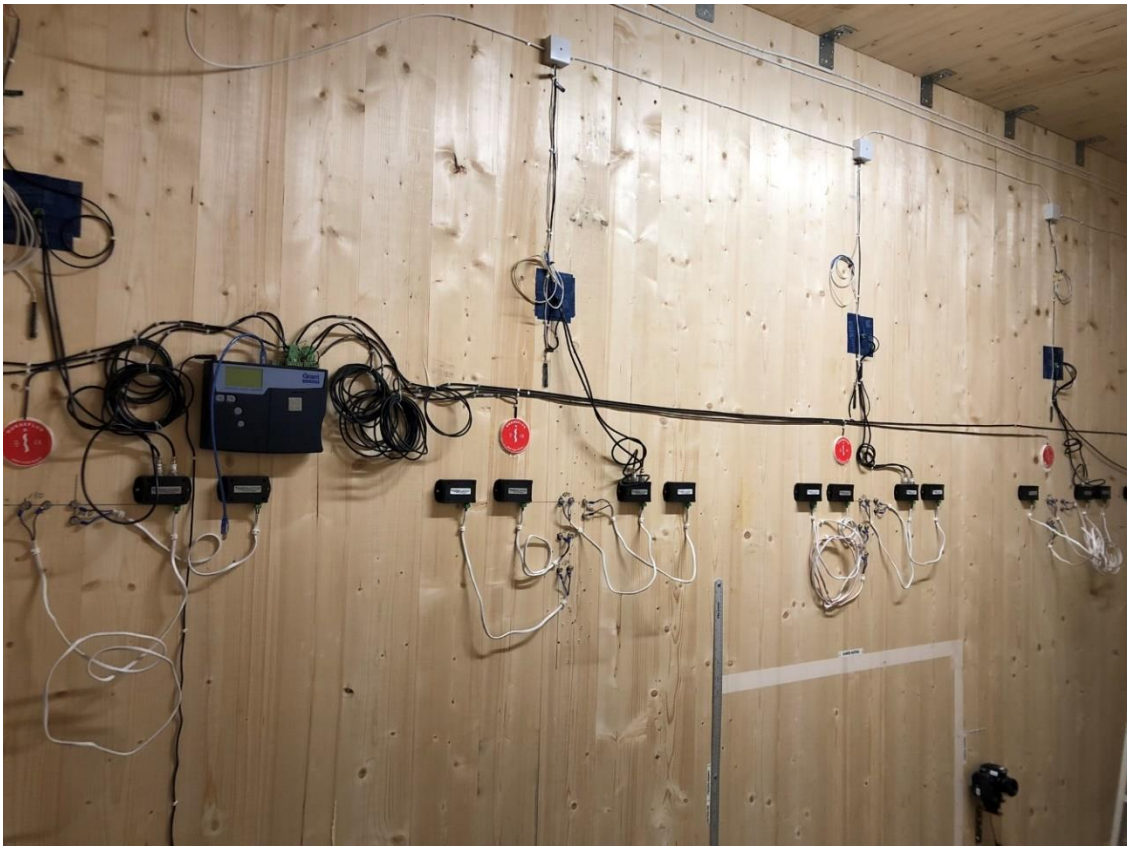
Seina vahekihtidesse paigaldati temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust (t&RH) mõõtvad andurid A-1 Humisense (mõõtetäpsus T= ±0.3°C temperatuurivahemikus 0° kuni 60°C; RH= ±2.0% vahemikus 0% kuni 100%)(Joonis 4.15). Pinnatemperatuuri (t_{si}- sisepind; t_{se}- välispind) mõõtmiseks kasutati andureid Uniflex t_s, (mõõtetäpsus T= ±0.5°C temperatuurivahemikus -10° kuni 85°C)(Joonis 4.15). Andurite mõõtmise intervalliks oli üks tund.



Joonis 4.14 Mõõteandurite paigaldus



Joonis 4.15 Temperatuuri ja suhtelise niiskuse andurid A-1 Humisense ning pinnatemperatuuri andurid Uniflex t_s

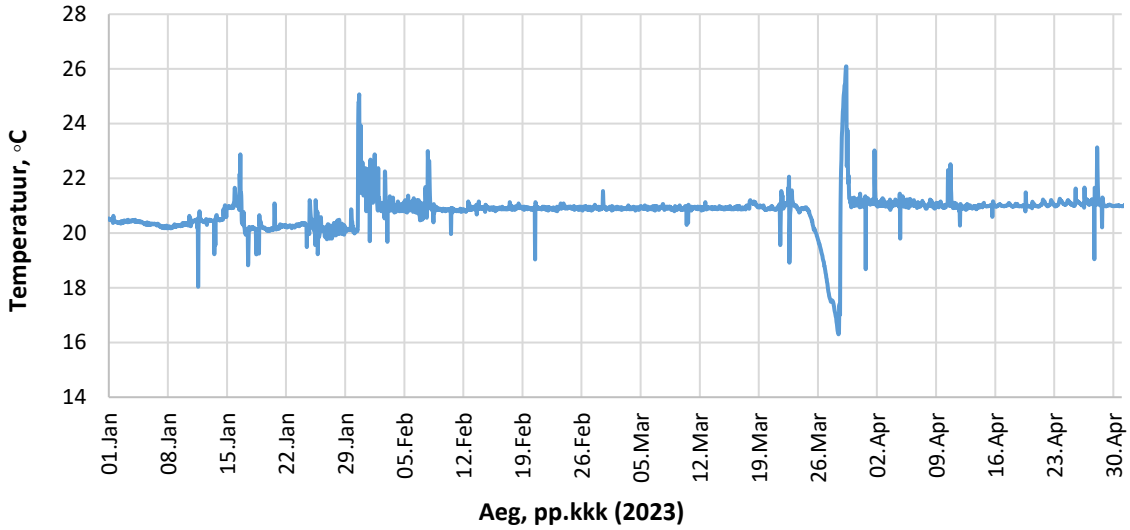


Joonis 4.16 Mõõteandurite süsteem testmaja katseseina sisepinnal

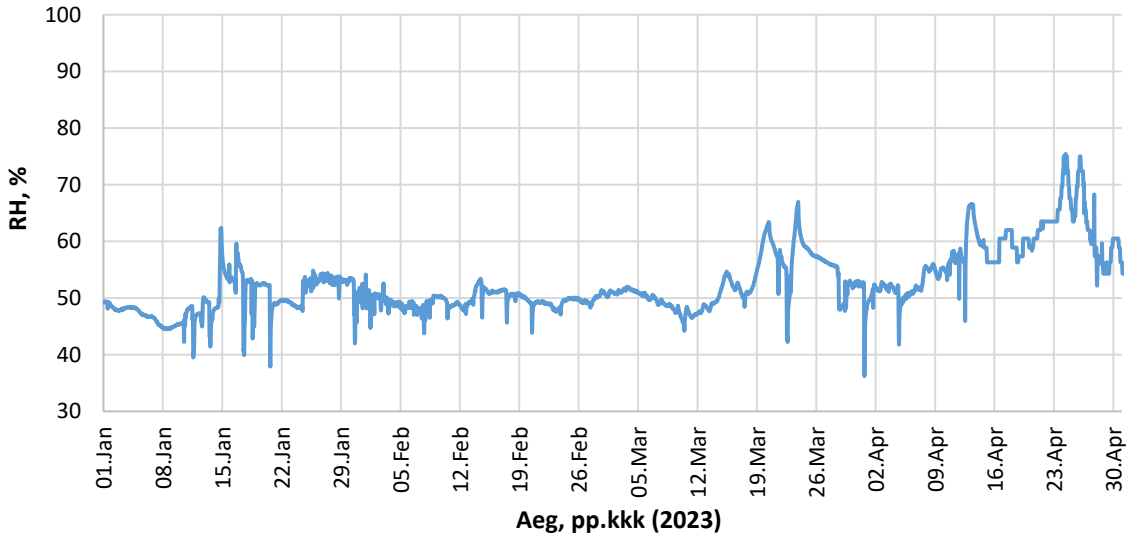
4.1.3 Katsekeskkond

4.1.3.1 Sisekliima

Ristkihtliimpuit testmajas on tagatud stabiilne sisekliima. Ruumi kütmine on tagatud radiaatoriga, mis on kaetud EPS-i plaatidega, et vähendada soojuskiirguse mõju soojusvoo plaatidele. Temperatuuri graafik testperioodil on toodud Joonis 4.17. Suhteline õhuniiskus testmajas testperioodi jooksul on toodud Joonis 4.18.



Joonis 4.17 Testmaja sisetemperatuur mõõteperioodil



Joonis 4.18 Testmaja suhteline õhuniiskus mõõteperioodil

CLT testmaja niiskuslisa arvutamisel lähtuti standardist EVS-EN ISO 13788:2012. Siseõhu niiskuslisa on siseõhu ja välisõhu veeaurusisalduste erinevus, mis sõltub niiskustootlusest ruumis, ruumi õhuvahetuskordsusest ja ruumi mahust. Niiskuslisa arvutatakse valemiga (4.4).

$$\Delta v = v_i - v_e = G/(n * V) \quad (4.4)$$

,kus Δv – siseõhu niiskuslisa [kg/m^3]

v_i – siseõhu veeaurusisaldus [kg/m^3]

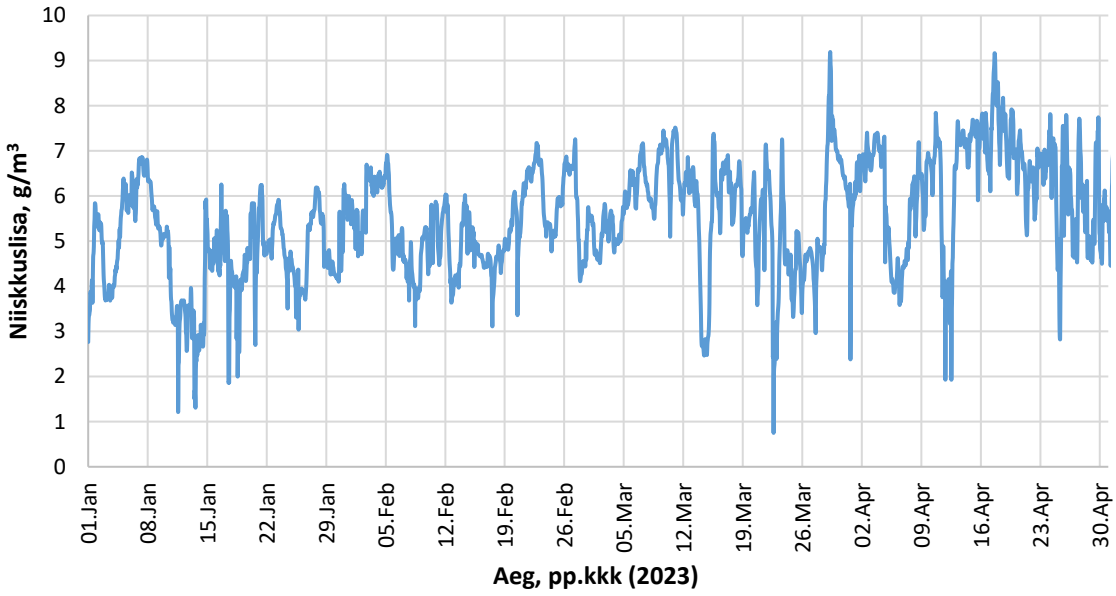
v_e – välisõhu veeaurusisaldus [kg/m^3]

G – niiskustootlus ruumis [kg/h]

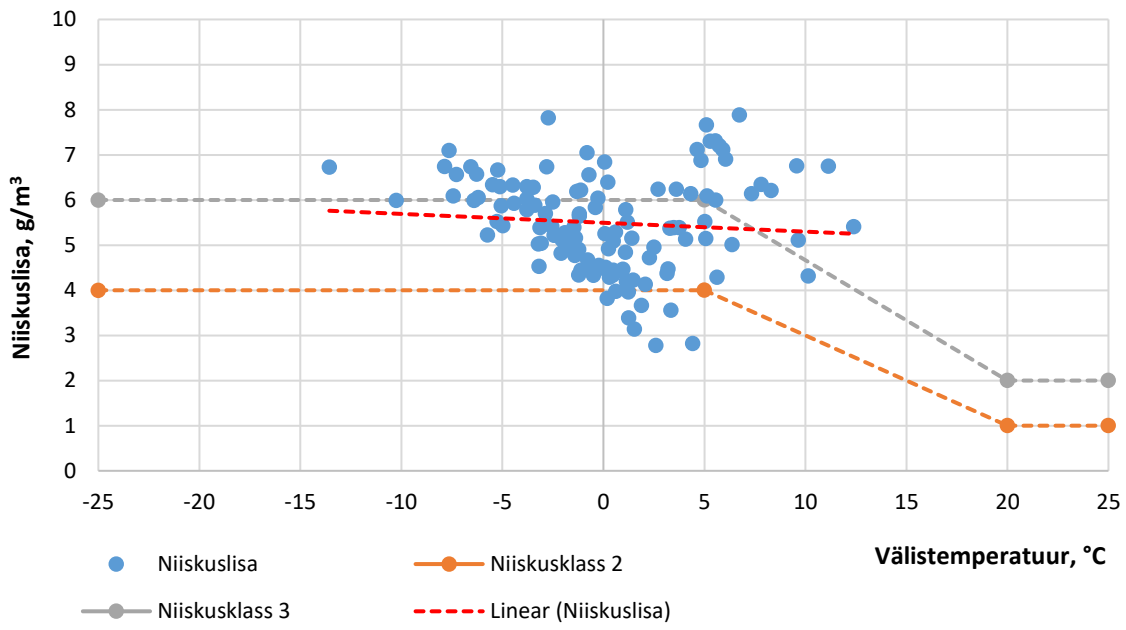
n – õhuvahetuskordsus [h^{-1}]

V – hoone sisemaht [m^3]

Niiskuslisa mõõteperioodi jooksul on toodud Joonis 4.19 ja Joonis 4.20, keskmiseks väärtuseks osutus 5.49 g/m^3.



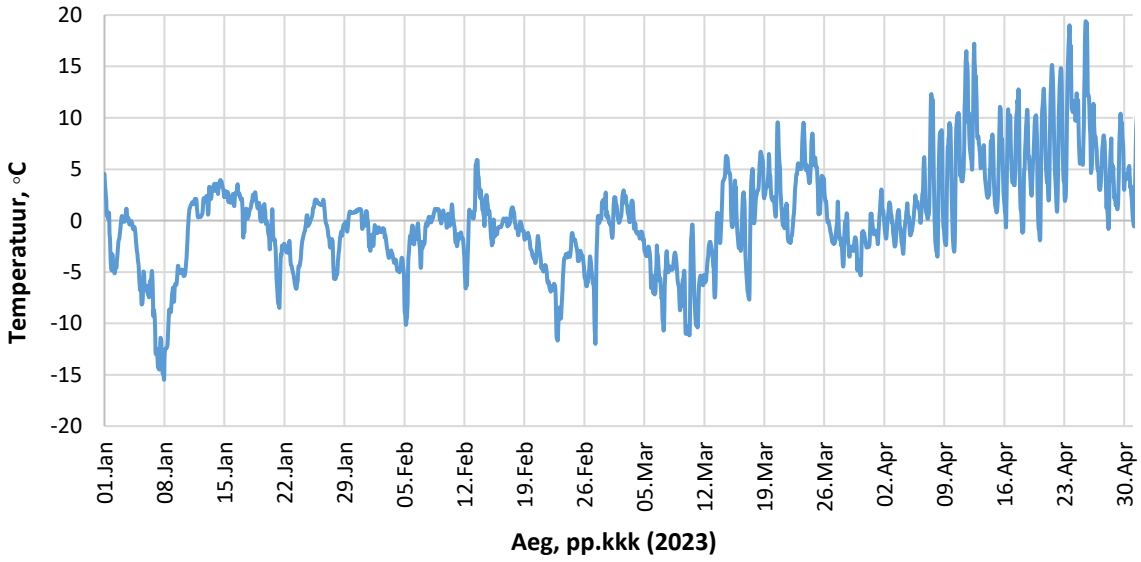
Joonis 4.19 Niiskuslisa testmajas mõõteperioodil



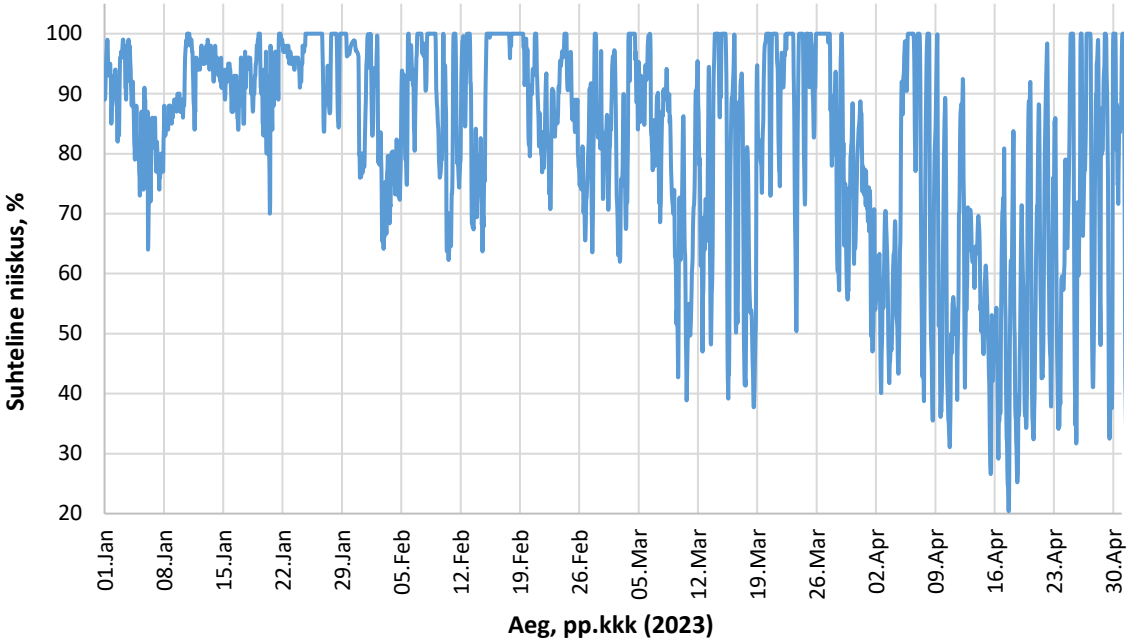
Joonis 4.20 Niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist

4.1.3.2 Väliskliima

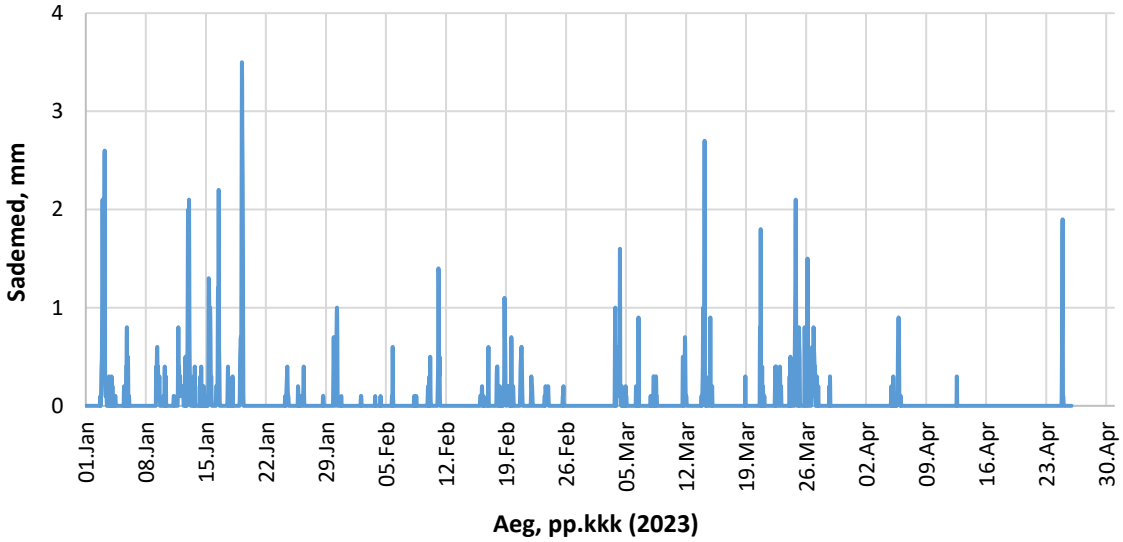
Väliskliima andmed saadi CLT testmaja kõrval asuvast Liginullenergia testmaja katusel olevast ilmajaamast ning Harku ilmajaamast. Vihmalekkega seotud mõõtmised teostati 2023. aasta aprillis kuu pikkuse perioodi jooksul. Väliskliima oli muutuv, temperatuur jäi vahemikku -15°C kuni +15°C. Välistemperatuuri graafik testperioodi jooksul on toodud Joonis 4.21, suhteline õhuniiskus väliskeskkonnas on toodud Joonis 4.22. Sademete hulk testperioodi jooksul on näidatud Joonis 4.23.



Joonis 4.21 Välistemperatuur mõõteperioodil



Joonis 4.22 Väline suhteline õhuniiskus mõõteperioodil



Joonis 4.23 Sademete hulk mõõteperioodil

4.1.3.3 Imiteeritud vihmaleke

Vihmalekke imiteerimiseks kasutati manuaalset süsteemi, kus süstla abil doseeriti nädalasele perioodile arvutatud vihmalekke veehulk, mis seejärel viidi testmaja ehituse käigus paigaldatud torude kaudu vajalikku seina kihti. Torude paigaldamist on näha Joonis 4.24-Joonis 4.26. Vihmalekke veehulk viidi seina kihti korraga üks kord nädalas. Vee aurustumise vältimiseks torus seistes kaeti toru otsad annustamiste vaheliseks ajaks teibiga. Õhu ligipääsu tagamiseks tehti teipi väike ava.

Joonis 4.24 Soojustust läbiva toru paigaldus

Joonis 4.25 Soojustust läbiva toru tihendamine mastiksiga

Joonis 4.26 Krohvi taguse toru paigaldus

Kaldvihma arvutusmetoodikas lähtuti standardist EVS-EN ISO 15927-3:2009. Arvutuseks vajalikud lähteandmed on tunnipõhine sademete hulk, tuule suund ja tuule kiirus. Eeltoodud andmed saadi CLT testmaja kõrval asuvast Liginullenergia testmaja katusel olevast ilmajaamast. Vihmalekke indeks avatud tasasel maastikul arvutati valemiga (4.5).

$$I_S = \frac{2}{9}\sum vr^{8/9}\cos(D-\theta) \tag{4.5}$$

,kus I_S – vihmalekke indeks avatud tasasel maastikul (airfield spell index) [l/m^2]

v – tunnipõhine keskmine tuulekiirus ([m/s]

r – tunnipõhine vihma kogus [mm]

D – tunnipõhine keskmine tuulesuund põhjasuuna suhtes [◦]

θ – seina orientatsioon põhjasuuna suhtes [◦]

Seina vihmalekke indeks saadi eeltoodud väärtuse korrutamisel erinevate koefitsientidega vastavalt valemile (4.6).

$$I_{WS} = I_S C_R C_T O W \tag{4.6}$$

,kus I_{WS} – seina vihmalekke indeks (wall spell index) [l/m^2]

I_S – vihmalekke indeks avatud tasasel maastikul [l/m^2]

C_R – maastikutüübi indeks (roughness coefficient) [-]

C_T – topograafia indeks (topography coefficient) [-]

O – takistuse tegur (obstruction factor) [-]

W – seina tegur (wall factor) [-]

Maastikutüübi indeks võtab arvesse keskmise tuulekiiruse muutust vastavalt maapinna kõrgusele ja maastikutüübile tuule puhumise suunas. Testmaja asub äärelinnale iseloomulikul maastikul ja seetõttu saame standardi järgi maastikutüübi indeksiks $C_R = 0{,}722$.

Topograafia indeks arvestab keskmise tuulekiiruse suurenemist küngaste tõttu. Testmaja asukohas selle mõju puudub, seetõttu võtame $C_T = 1$.

Takistuse tegurit tuleb arvestada, kui seina läheduses asetseb mõni vähemalt seinaga sama kõrge objekt. Testmajast 15-25 meetri kaugusel asub Liginullenergia testmaja ja sellest lähtuvalt tuleb võtta takistus tegur $O = 0{,}4$.

Vihma hulk, millega sein kokku puutub, sõltub seina tüübist, kõrgusest ja katusest. Seda arvestab seina tegur, mille väärtuseks võtame $W = 0{,}4$, kuna antud juhul on testmaja näol tegemist lamekatusega.

Valideeritud mudeli puudumisel arvestatakse enamasti Põhja-Ameerika Standardi (ASHRAE 160-2016) järgi, et kaldvihma kogusest tungib fassaadi taha 1%. (Kahangi Shahreza et al., 2022) Sama väärtus on saadud ka horisontaalse praoga ETICS-i korral rõhu erinevusega kuni 500 Pa. (Van Linden & Van Den Bossche, 2022) Sellest lähtuvalt arvestati antud töös läbi viidud katses veelekke suuruseks 1% maksimaalsest nädalasest kaldvihma hulgast. Arvutusteks vajalikud andmed (sademete hulk, tuule

suund, tuule kiirus) saadi Harku ilmajaamast. Mõõteperioodi jooksul arvutatud kaldvihma hulgad ja vastavad vihmalekke suurused on toodud Tabel 4.2. Suurimaks nädalaseks vihmalekkeks osutus 1.38 ml. Mõõteperioodi vihmavaesuse tõttu tehti ka arvutus hallituse testaasta järgi ja leiti aasta keskmine nädalane vihmalekke hulk, milleks osutus 1,52 ml. Tulemuste paremaks ilmnemiseks võeti sellest lähtuvalt iganädalaseks vihmalekke hulgaks, mis testseinadesse viia, 2 ml.

Tabel 4.2 Mõõteperioodi jooksul esinenud kaldvihma hulk ja hinnatav vihmalekke kogus

Periood	Kogu kaldvihma hulk, l/m^2	Vihmalekke kogus (1%), ml
29.03 – 04.04	0.0146	0.146
05.04 – 11.04	0.1381	1.381
12.04 – 18.04	0.0163	0.163
19.04 – 25.04	0.0952	0.952

4.2 Arvutusmetoodika

4.2.1 Arvutustarkvara

Katsetatud soojusisolatsiooni liitsüsteemi modelleerimiseks kasutati arvutustarkvara Delphin 6.1.5. See on simulatsioonitarkvara soojuse, niiskuse ja osakeste liikumise määramiseks poorsetes ehitusmaterjalides, mis on välja töötatud Dresdeni Tehnikaülikooli ehitusklimatoloogia instituudis. (*DELPHIN*, n.d.)

Tarkvara Delphin koodi aluseks on füüsikaline mudel akronüümiga CHAMPS (coupled heat, air, moisture, pollutant simulation), mis tähistab soojuse, õhu, niiskuse ja saasteainete kombineeritud simulatsiooni. CHAMPS mudel hõlmab voogude kirjeldust arvutusruumis või väljal ja selle piiril füüsikamudelite alusel. Seejuures on ka mudelid salvestusprotsesside nagu adsorptsioon, desorptsioon ja vabastamine kirjeldamiseks.

Väljavoolu ja salvestuse kirjeldus tehakse tavaliselt bilanssvõrrandite kogumi abil. Need bilanssvõrrandid on paraboolsed ja selle probleemi jaoks pole suletud analüütilist lahendust. Transpordi koefitsiendid sõltuvad tavaliselt seisundi muutujatest. Need võivad varieeruda mitme suurusjärgu ulatuses, nagu näiteks vee juhtivus. Seetõttu on arvuline lahendus ainus võimalus lahendamaks kombineeritud CHAMPS olukorda.

Arvuline lahendus viiakse läbi pool-diskretiseerimisega ruumis kasutades lõpliku/kontrollruumi meetodit ja järgneva ajas integreerimisega.

Niiskustasakaalu arvutamisel tehakse järgmised eeldused:

- Aurustumise tasakaal (Kelvini võrrand).
- Difuusne veevool, hajutatud vee ja veeauru vool on ebaoluline.
- Rõhu tasakaal kõigi faaside vahel.
- Tahke materjali maatriksi moonutused on ebaolulised.
- Jää ei liigu.

Niiskustasakaalu arvutamisel kasutatakse järgmisi tasakaaluvõrrandeid:

- Niiskustasakaal

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_{REV}^{m_{w+v+i}} = -\frac{\partial}{\partial x}\left[j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_w}\right] + \sigma_{REV}^{m_{W+v+i}} \tag{4.7}$$

,kus $\rho_{REV}^{m_{w+v+i}}$ – niiskuse tihedus referentsruumalas (vesi + veeaur + jää) [kg/m^3]

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

$j_{conv}^{m_v}$ – konvektiivne veeauru voog (õhuvoo olemasolul) [kg/m^{2}s]

$j_{diff}^{m_w}$ – difuusne veeauru voog [kg/m^{2}s]

$\sigma_{REV}^{m_{W+v+i}}$ – niiskuse lisa/kadu referentruumalas [kg/m^3]

- Konvektiivne (kapillaarne) vee voog

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l(w)\left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g\right] \tag{4.8}$$

,kus $K_l(w)$ – veejuhtivus sõltuvalt veesisaldusest [s]

p_l – vee rõhk [Pa]

ρ_l – vee tihedus [kg/m^3]

g – raskuskiirendus [m/s^2]

- Konvektiivne veeauru voog

$$j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} j_{conv}^{m_g} \tag{4.9}$$

,kus $c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_v + p_a} * \frac{R_a}{R_v}$

$c_g^{m_v}$ – veeauru kontsentratsioon [kg/kg]

p_v – veeauru osarõhk [Pa]

p_a – õhu osarõhk [Pa]

R_a – universaalne gaasikonstant [287.10 J/kgK]

R_v – veeauru gaasikonstant [461.89 J/kgK]

$j_{conv}^{m_g}$ – konvektiivne voog [kg/m^{2}s]

- Difusioone veeauru voog

$$j_{diff}^{m_v} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x} \tag{4.10}$$

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

$D_{v,air}(T)$ – veeaurujuhtivus õhus (Schirmer´i võrrand) [m^2/s]

μ – veeauru difusioonitakistustegur [-]

θ_g – maht gaasilises olekus ruumalaühiku kohta [m^3/m^3]

θ_{por} – materjali poorsus [m^3/m^3]

θ_l – maht vedelas olekus ruumalaühiku kohta [m^3/m^3]

$f(\theta_g)$ – funktsioon mahust gaasilises olekus ruumalaühiku kohta [-]

Õhu tasakaalu arvutamisel tehakse järgmised eeldused:

- Kuiv õhk koosneb O_2, N_2 ja teistest väiksematest komponentidest, välja arvatud lenduvad orgaanilised ühendid (VOC – volatile organic compounds) ja H_2O (veeaur).
- Gaasifaas koosneb kuivast õhust, veest ja lenduvatest orgaanilistest ühenditest (VOC).
- Gaasi konvektiivne voog arvestatakse eraldi soojus-, niiskus- ja saasteainete liikumisest. See tähendab, et soojus-, niiskus- ja saasteainete transport ei mõjuta õhuvoolu muu kui üleslükkejõuga.
- Arvesse võetakse ainult laminaarset gaasi voogu.
- Liikumise kineetiline energia on ebaoluline.
- Kuiva õhu gaasikonstanti saab kasutada niiske õhu korral.

Õhu tasakaalu arvutamisel kasutatakse järgmiseid tasakaaluvõrrandeid:

- Õhu tasakaaluvõrrand

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_{REV}^{m_a} = -\frac{\partial}{\partial x}[j_{conv}^{m_a}] + \sigma_{REV}^{m_a} \tag{4.11}$$

,kus $\rho_{REV}^{m_a}$ – õhu tihedus referentsruumalas [kg/m^3]

$j_{conv}^{m_a}$ – konvektiivne õhuvoog [kg/m^{2}s]

$\sigma_{REV}^{m_a}$ – õhu lisa/kadu referentsruumalas [kg/m^{2}s]

- Konvektiivne õhuvoog

$$j_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} j_{conv}^{m_g} \tag{4.12}$$

,kus $c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_v+p_a} * \frac{R_v}{R_a}$ ja $j_{conv}^{m_g} = -K_g(w)[\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g g]$

$c_g^{m_a}$ – õhu kontsentratsioon [kg/kg]

p_v – veeauru osarõhk [Pa]

p_a – õhu osarõhk [Pa]

R_a – universaalne gaasikonstant [287.10 J/kgK]

R_v – veeauru gaasikonstant [461.89 J/kgK]

$j_{conv}^{m_g}$ – konvektiivne voog [kg/m^{2}s]

$K_g(w)$ – materjali gaasi läbilaskvus sõltuvalt veesisaldusest [s]

$p_g = p_a + p_v$ – gaasi rõhk [Pa]

$\rho_g = \frac{p_g}{R_a T}$ – gaasi tihedus [kg/m^3]

Bilanssvõrrandite kogumi määratlemisega luuakse raamistik erinevate CHAMPS olukordade lahendamiseks. Arvutusmudeli lahendamiseks on vajalik ka tingimuste, nagu alg- ja piirtingimused, määratlemine. Lõpuks rakendatakse arvuline lahendus võrrandisüsteemi lahendamiseks.

Delphin on mitmeid kordi valideeritud, seejuures keskendudes tarkvara eri aspektidele ning seda katsetega, millede andmeid ei ole eelnevas tarkvara kalibreerimise faasis kasutatud. Simulatsiooniprogrammi rakenduse ja numbrilise lahendusmeetodi kontrollimiseks tehti järgmised katsed:

- HAMSTAD Võrdlusalused 1-5 (Ajutine soojuse, õhu ja niiskuse transport)
- EN 15026: 2007 (Ajutine soojuse ja niiskuse transport)
- EN 10211: 2007 (Stabiilse soojuse transport)
- IBK niisutamine ja kuivamine (Ajutine soojuse ja niiskuse transport, keskendudes kapillaartranspordile keskmises ja madalas niiskusvahemikus)

Transpordimudelit ning integreeritud materjali- ja kliimaandmete mudeleid testiti erinevates uurimisprojektides.

Katsemajad:

- Talstrasse (Dresden)
- Herrenschießhaus (Nürnberg)
- Gemeinschaftshaus (Nürnberg-Langwasser)
- Umgebindehaus (Ebersbach)
- Fachwerkhaus (Niedersachsen/Edemissen)
- Bahnmeistergasse (Senftenberg)
- Handwerk 15 (Görlitz)

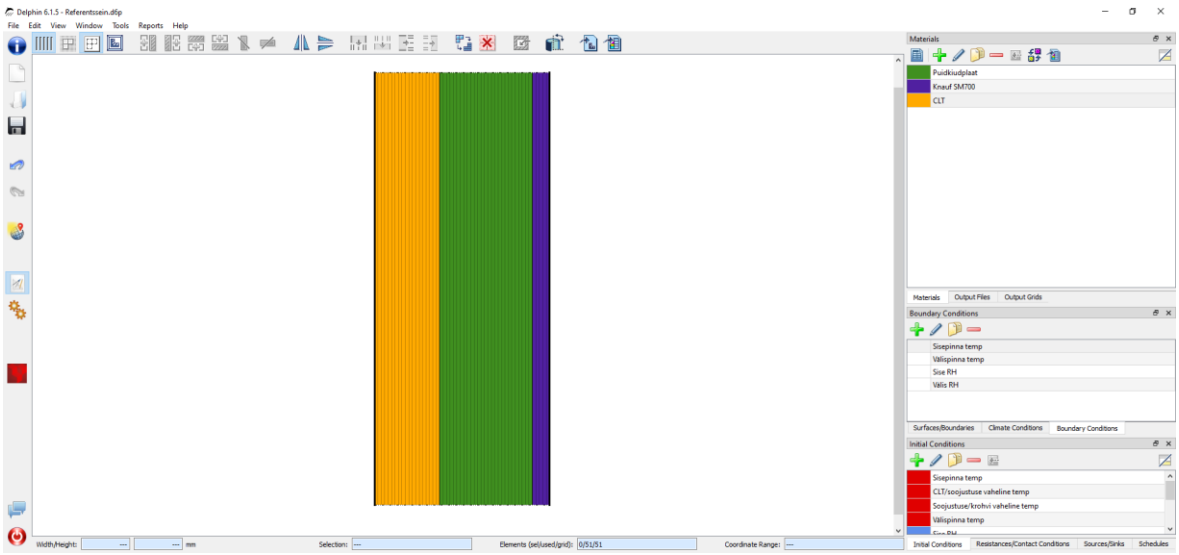
Väitekirjad:

- Gregor Scheffler, Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage (1978)

Lisaks kasutasid ja kasutavad Delphin´i mitmed uurimisinstituudid ning seda testitakse ja kohandatakse pidevalt erinevate rakendusjuhtumite jaoks.

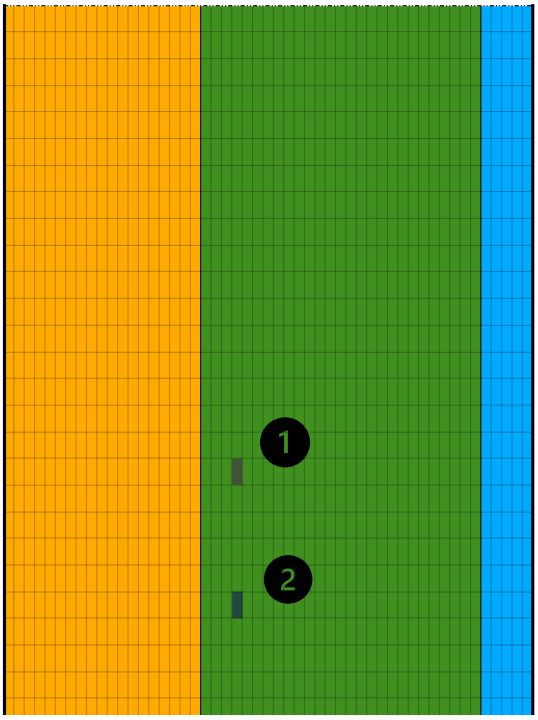
4.2.2 Modelleerimise metoodika

Modelleerimise eesmärgiks oli saavutada arvutusmudel, mis kajastab töös käsitletud välispiirde soojus- ja niiskustehnilist toimivust võimalikult tõetruult. Selleks valideeriti koostatud arvutusmudel mõõdetud katsetulemuste põhjal. Mudeli ääretingimusteks määrati CLT katsemajja paigaldatud anduritega fikseeritud kliimatingimused – tarindi välispinna temperatuur, väliskeskkonna suhteline niiskus, sisepinna temperatuur ja sisekeskkonna suhteline niiskus. Seina välis- ja sisepinnale määrati pinnatakistus ning kihtidele algtingimused (temperatuur, niiskussisaldus). Mudelis kasutatud materjalide aluseks võeti Delphin´i andmebaasis leiduvad ehitusmaterjalid, mille soojuserijuhtivus ja veeauru difusiooni-takistustegur vajadusel korrigeeriti, et saavutada katsetulemustega võrdväärne olukord. Pilt mudelist on toodud Joonis 4.27. Arvutustulemuste õigsust kontrolliti temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusel katsetulemustega erinevates tarindi kihtides. Samamoodi koostati arvutusmudel ka õhu- ja aurutõkkega ristlõikele.



Joonis 4.27 Kuvatõmmis arvutusmudelist tarkvaras Delphin 6.1.5

Pärast arvutusmudeli valideerimist koostati 2D mudel, et oleks võimalik sisestada arvutusse vihmaleke selle täpse asukohaga. (Joonis 4.24, Joonis 4.28) Nii koostati arvutusmudelid kõigile ristlõigetele, et hiljem võrrelda arvutusi mõõtmistulemustega.



Joonis 4.28 1) Anduri asukoht mudelis; 2) Vihmalekke asukoht mudelis

Viimase sammuna määrati valideeritud mudelitele hallituse testaasta (Kalamees & Vinha, 2004) väliskliima tingimused, et leida vihmalekke hulk, mille korral ületab hallituse kasv seatud kriitilise piiri. Sisekliimana kasutati (Ilomets et al., 2018) temperatuuri mudelit ja niiskuslisale $\Delta v = 4\ g/m^3$ vastavat suhtelist õhuniiskust. Mudelite arvutused viidi läbi erinevate vihmalekke hulkadega ja 5 aastasele perioodile.

4.2.3 Hindamiskriteeriumid

Hallituse kasvu hindamiseks kasutatakse Hukka ja Viitaneni poolt välja töötatud arvutusmudelit ja hallitusindeksit. (Viitanen et al., n.d.) Hallituse kasvu mudel on esitatud valemiga (4.13).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 * \exp\left(-0.68 lnT - 13.9 lnRH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02\right)} k_1 k_2 \tag{4.13}$$

,kus k_1 – hallituse kasvu intensiivsus [-]

W – puidu liik [0=mänd, 1=kuusk]

SQ – pinnakvaliteet [SQ=0 - saepind, SQ=1 - ahjus kuivatatud]

M – hallitusindeks [-]

t – aeg [h]

k_2 – kasvu aeglustumise tegur hallituse kasvu intensiivsuse jõudmisel maksimumi lähedale [-]

T – temperatuur [°C]

RH – suhteline õhuniiskus [%]

Hallituse kasvu intensiivsus k_1 arvutatakse valemiga (4.14).

$$k_1 = \begin{cases} 1 & ,kui\ M \leq 1 \\ \dfrac{2}{T_{M=3}/T_{M=1} - 1} & ,kui\ M > 1 \end{cases} \tag{4.14}$$

,kus $T_{M=1}$ – aeg, mis kulub hallituse kasvu algamiseni

$T_{M=3}$ – aeg, mis kulub taseme $M = 3$ saavutamiseks

Hallituse kasvu aeglustumise tegur k_2 arvutatakse valemiga (4.15).

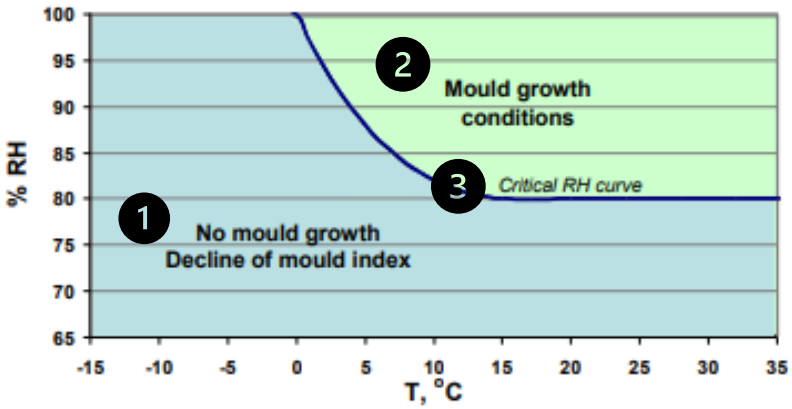
$$k_2 = \max\left[1 - \exp[2.3 * (M - M_{max})], 0\right] \tag{4.15}$$

,kus maksimaalne hallitusindeks M_{max} arvutatakse vastavalt hetke tingimustele valemiga (4.16).

$$M_{max} = 1 + 7\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - 2 * \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100}\right)^2 \tag{4.16}$$

,kus RH_{crit} on suhteline õhuniiskus, mille juures algab hallituse kasv.

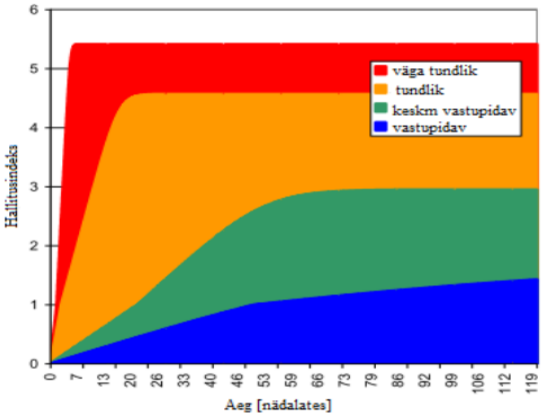
Hallituse kasvutingimuste sõltuvus temperatuurist ja suhtelisest õhuniiskusest on toodud Joonis 4.29.



Joonis 4.29 Hallituse kasvutingimused. 1) Hallituse kasv puudub, hallitusindeksi langus; 2)Hallituse kasvuks soodsad tingimused; 3)Kriitilise suhtelise õhuniiskuse kõver

Hallitusindeksi arvutamisel tuleb määrata materjali ja materjali pinna tundlikkus hallituse suhtes. (Tabel 4.3) Ristkihtliimpuit liigitub mudeli järgi hallituse suhtes tundlikuks materjaliks.

Tabel 4.3 Hallituse kasvu tundlikkuse klassid ja mõned neile vastavad materjalid. Graafik tabelis illustreerib arvatavat hallituse kasvu erinevate tundlikkuse klasside korral temperatuuri juures 22°C ja suhtelise õhuniiskusega 97%.

Tundlikkuse klass	**Materjalid**	
Väga tundlik	Männi maltspuit	
Tundlik	Liimitud puitplaadid, PUR paberpinnaga, kuusk	
Keskmise vastupidavusega	Betoon, gaasbetoon, klaasvill, polüestervill	
Vastupidav	PUR fooliumpinnaga	

Lisaks on vaja määrata hallitusindeksi langemise klassifikatsioon hallituse kasvule ebasoodsates tingimustes. (Tabel 4.4) Klassifikatsioon põhineb üksikutel mõõtmistel suhteliselt suure hajuvusega ja soovituslik on kasutada kõige tagasihoidlikumat väärtust. Antud töö tulemuste hindamisel arvestati samuti, et langus on peaaegu olematu.

Tabel 4.4 Suhtelise hallitusindeksi languse klassifikatsioon

C_{eff}	**Kirjeldus**
1.0	Mänd originaalmudelis, lühikesed perioodid
0.5	Märgatav asjakohane langus
0.25	Võrdlemisi väike langus
0.1	Peaaegu ilma languseta

Hallitusindeksi skaala on toodud Tabel 4.5. Antud töös seatakse lähtuvalt (Viitanen et al., 2015) kriitiliseks piiriks $M = 1$, mille ületamisel eeldatakse, et tekib liigne hallituse kasv. Eesmärgiks on leida maksimaalne vihmalekke suurus, mille korral tarindi hallitusindeks ei ületa 5 aastase arvutuse jooksul seda väärtust.

Tabel 4.5 Hallitusindeksi skaala

Hallitusindeks	**Hallituse kasvu kirjeldus**
0	Kasv puudub
1	Väike hallituse hulk pinnal (mikroskoopiline), lokaalse kasvu esmased etapid
2	Mitmed lokaalsed hallituse kolooniad pinnal (mikroskoopilised)
3	Visuaalselt nähtav hallitus pinnal, <10% hallitusega kaetud või <50% mikroskoopilise hallitusega kaetud
4	Visuaalselt nähtav hallitus pinnal, 10-50% hallitusega kaetud või >50% mikroskoopilise hallitusega kaetud
5	Laialdane visuaalselt nähtav hallitus pinnal, >50% nähtava hallitusega kaetud
6	Suuremahuline ja tihe hallituse kasv, umber 100% pinnast hallitusega kaetud

5. TULEMUSED

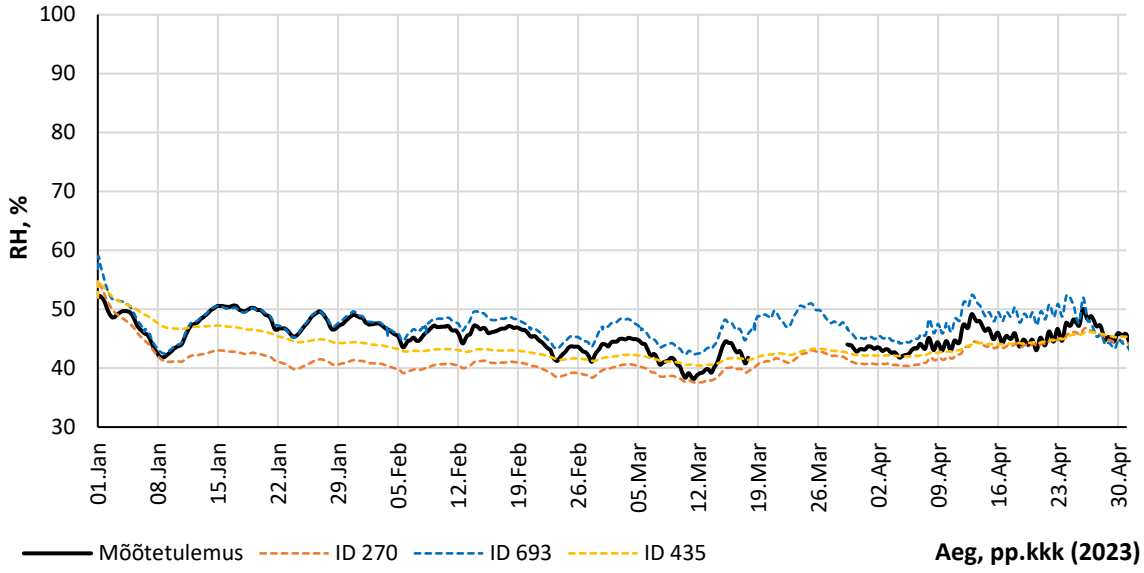
5.1 Arvutustulemuste võrdlus mõõtetulemustega

5.1.1 Referentseina 4.1 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

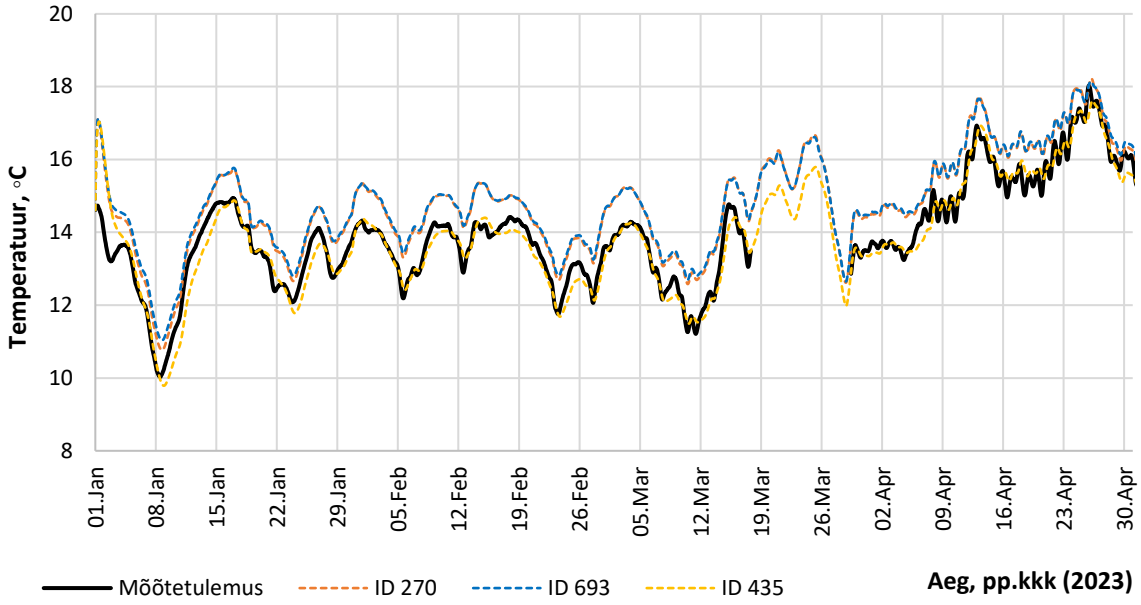
Mudeli loomisel viidi testarvutused läbi arvutustarkvara andmebaasis leiduvate erinevate puitkiud-soojustusplaatidega ja krohvidega. Allpool on toodud kolme soojustusega ja kolme krohviga saadud arvutustulemuste võrdlus mõõtetulemustega. Arvutused teostati materjalide omadustest ülevaate saamiseks kõigepealt ainult suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuriga ning hiljem ka lisades kaldvihma ja päikesekiirguse. Perioodidel, kus andurid mõõtetulemusi ei edastanud, on graafikutel jäetud lüngad.

5.1.1.1 Väliskliimaks suhteline õhuniiskus ja temperatuur

Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva soojustusega punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.1. Temperatuuride võrdlus samas punktis on toodud Joonis 5.2.

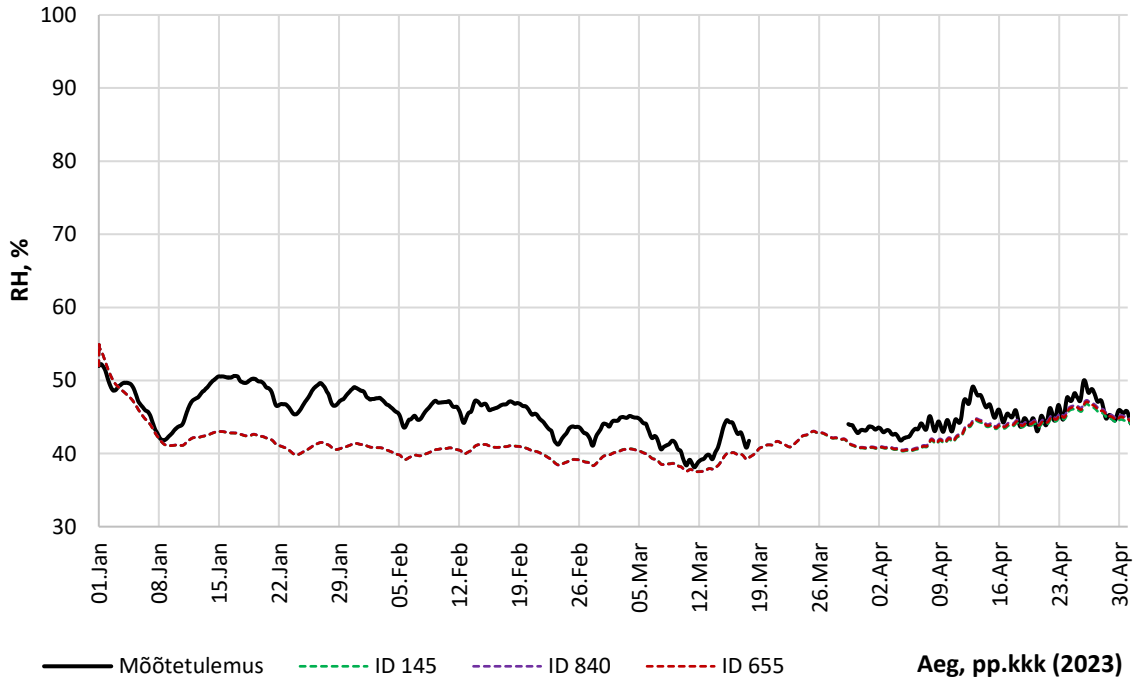


Joonis 5.1 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L1 kolme erineva soojustusega



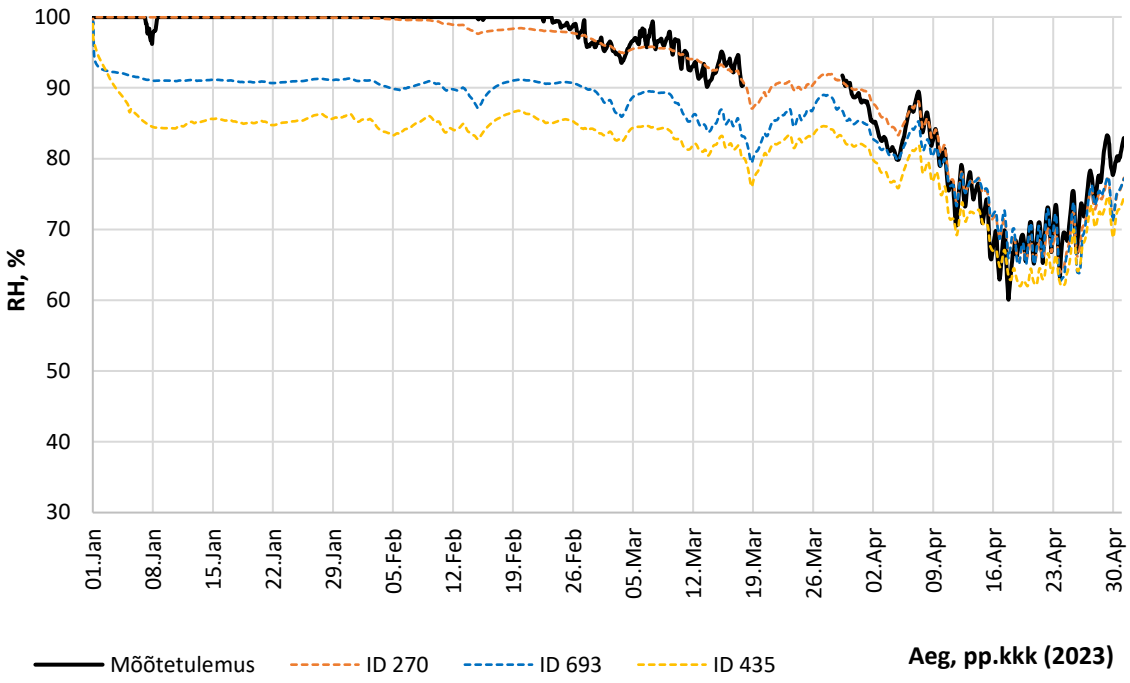
Joonis 5.2 Temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L1 kolme erineva soojustusega

Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva krohviga punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.3.

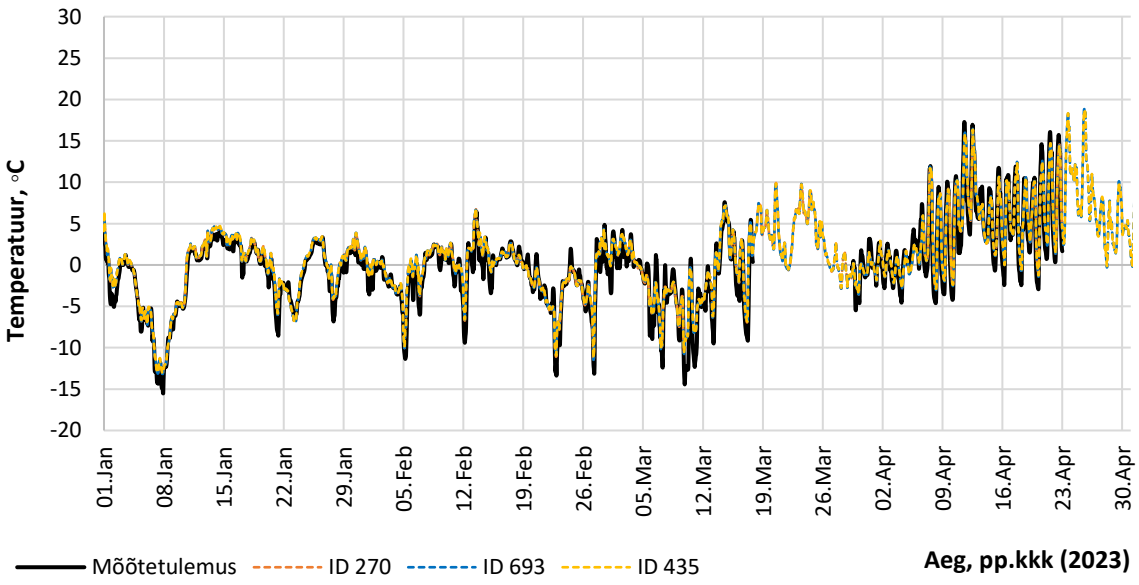


Joonis 5.3 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L1 kolme erineva krohviga

Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva soojustusega punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.4. Temperatuur samas punktis on toodud Joonis 5.5.

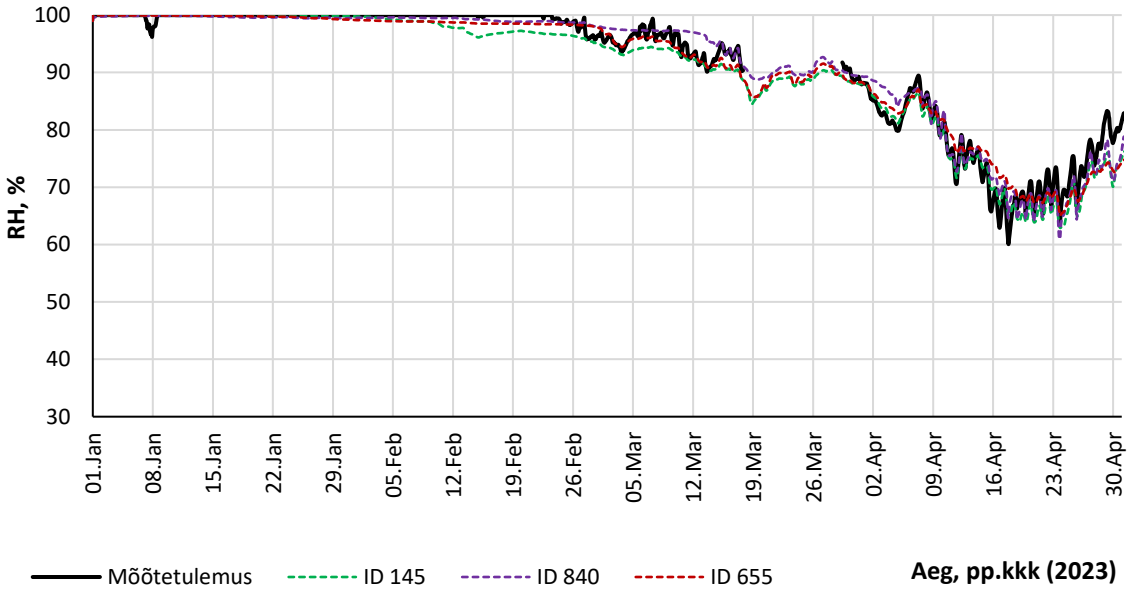


Joonis 5.4 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L2 kolme erineva soojustusega



Joonis 5.5 Temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L2 kolme erineva soojustusega

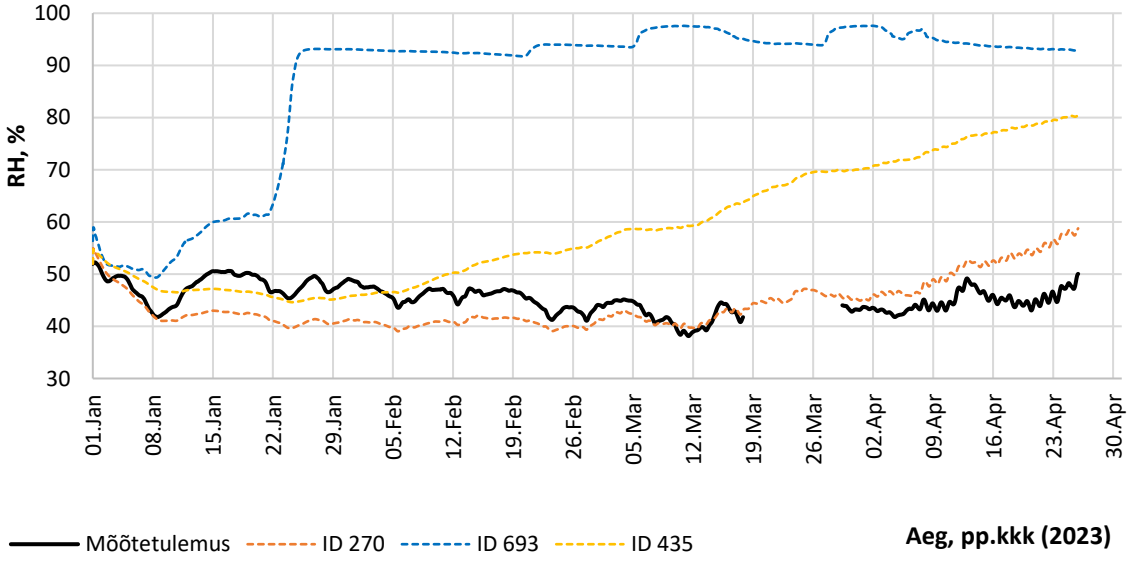
Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva krohviga punktis L2 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.6.



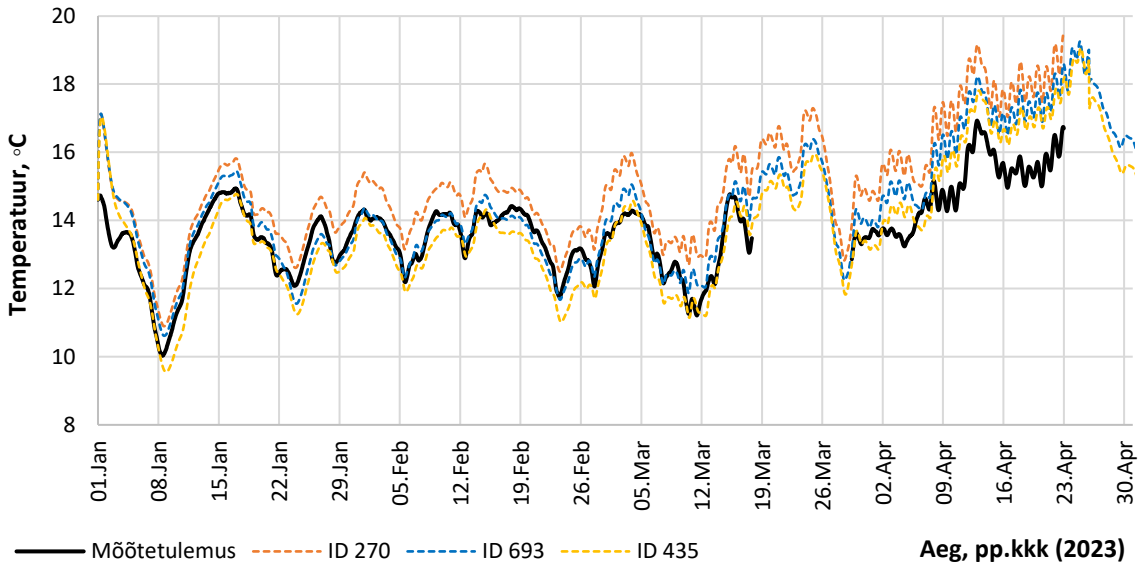
Joonis 5.6 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L2 kolme erineva krohviga

5.1.1.2 Väliskliimale lisatud kaldvihm ja päikesekiirgus

Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva soojustusega punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.7. Temperatuuri väärtused samas punktis on toodud Joonis 5.8.

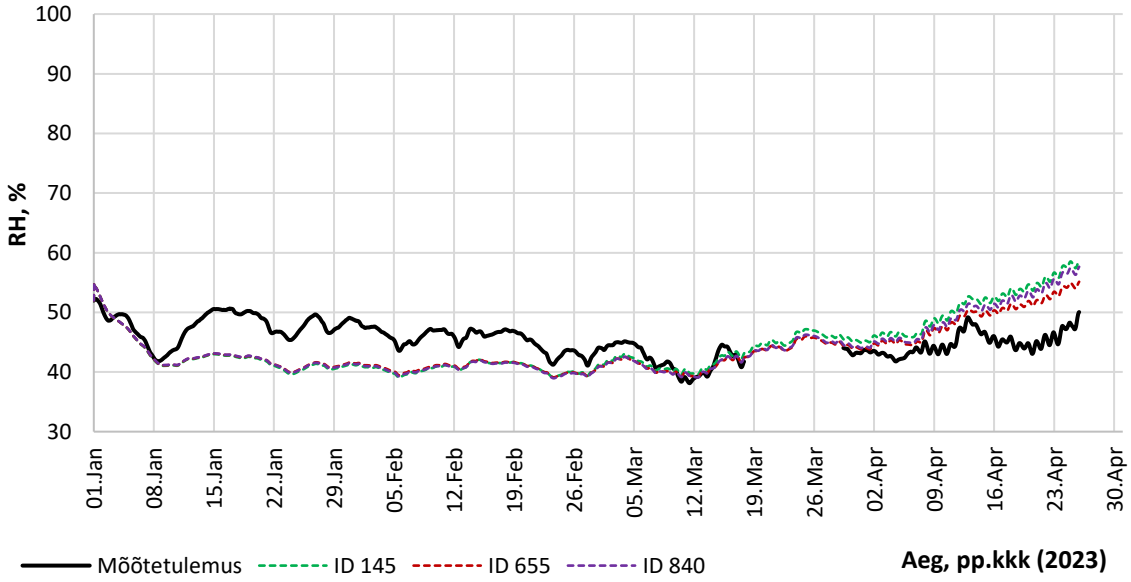


Joonis 5.7 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L1 kolme erineva soojustusega



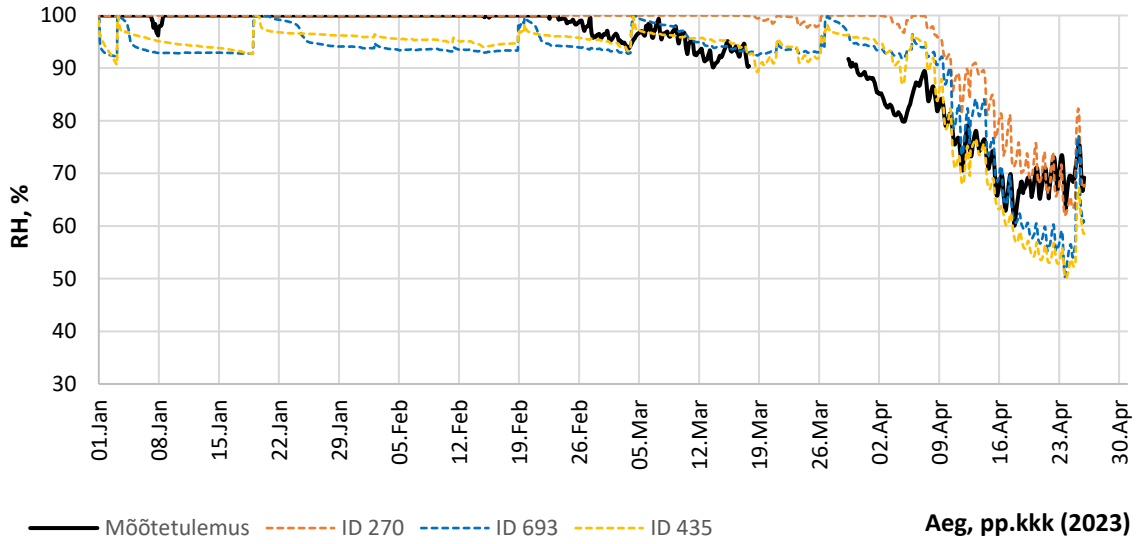
Joonis 5.8 Temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L1 kolme erineva soojustusega

Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva krohviga punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.9.

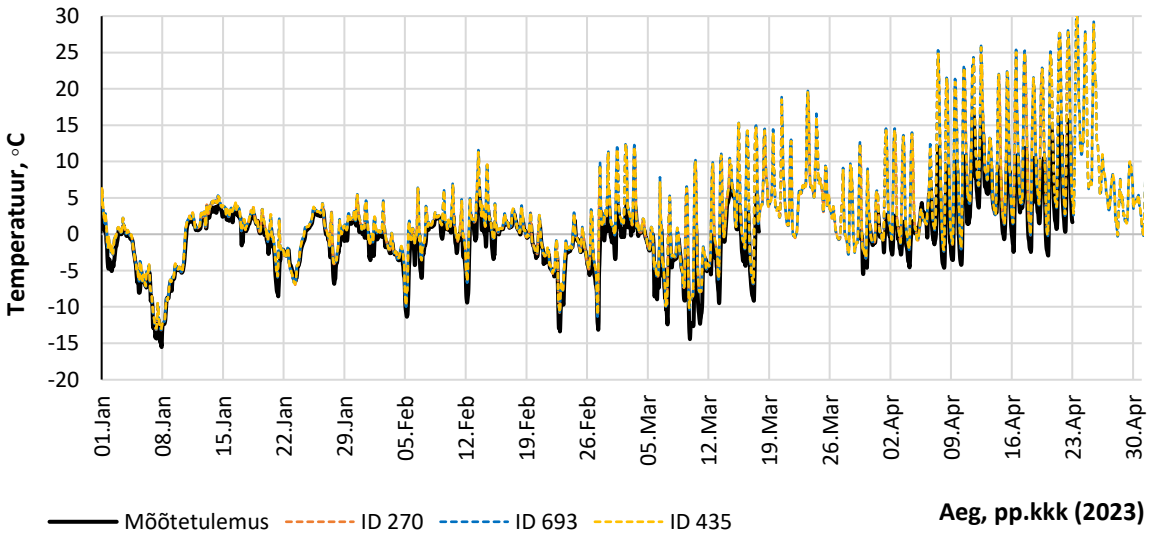


Joonis 5.9 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L1 kolme erineva krohviga

Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva soojustusega punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.10. Temperatuur samas punktis on toodud Joonis 5.11.

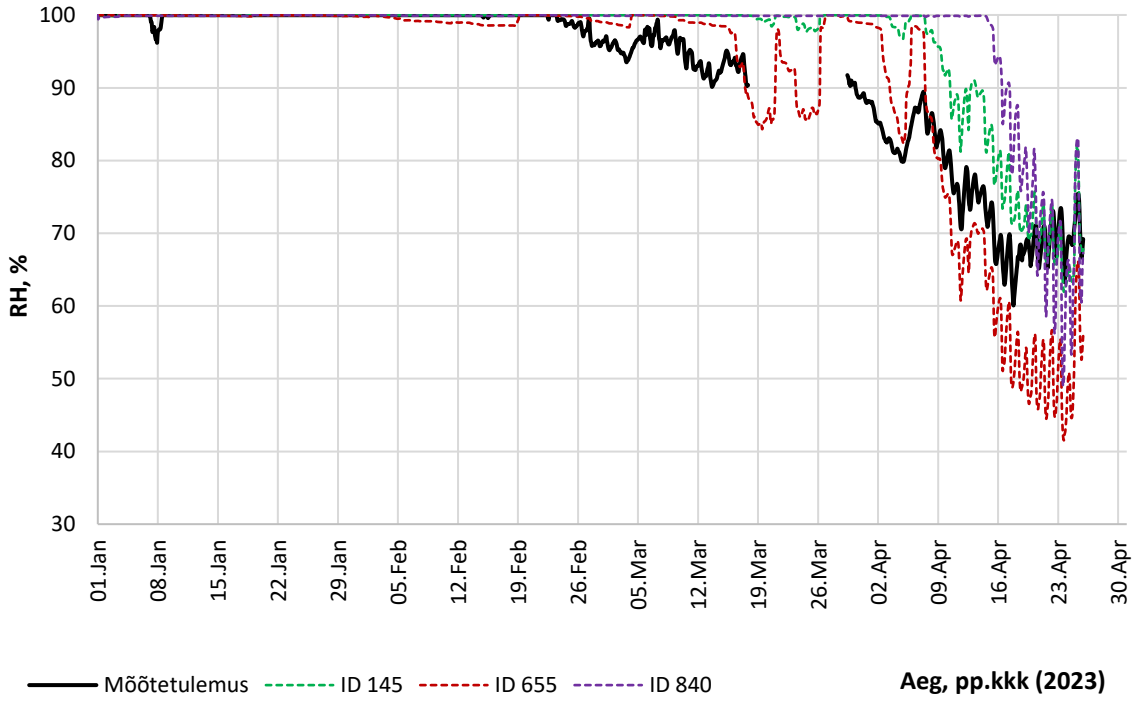


Joonis 5.10 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L2 kolme erineva soojustusega



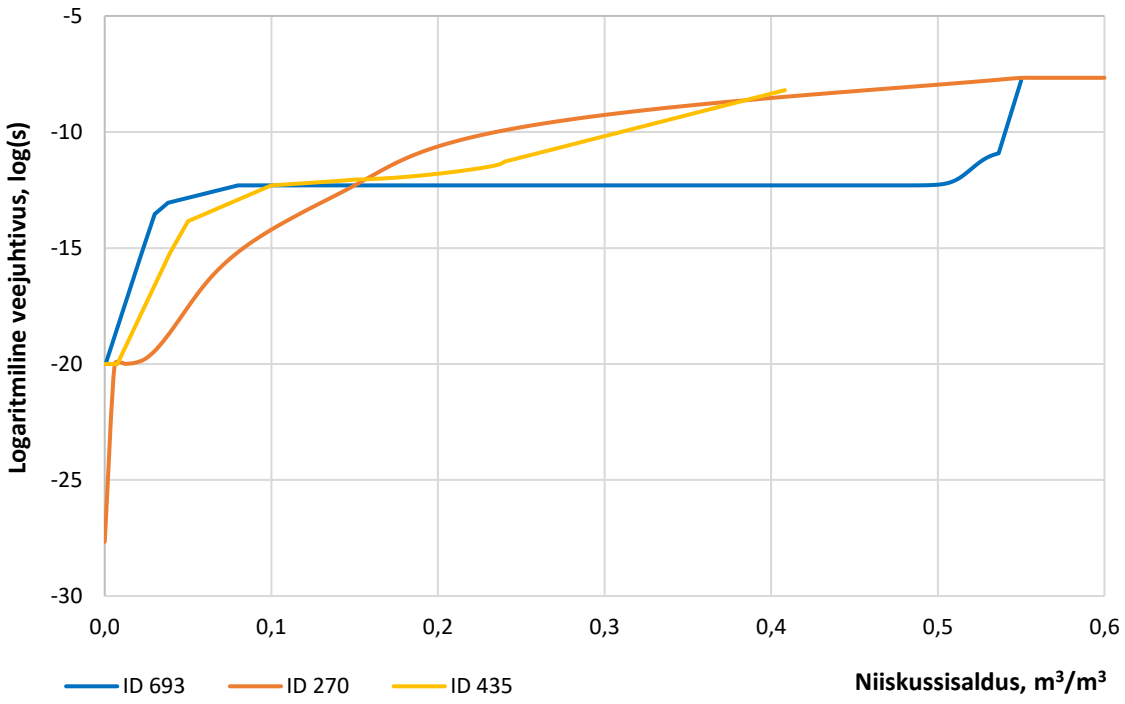
Joonis 5.11 Temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L2 kolme erineva soojustusega

Referentsseina 4.1 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused kolme erineva krohviga punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.12.



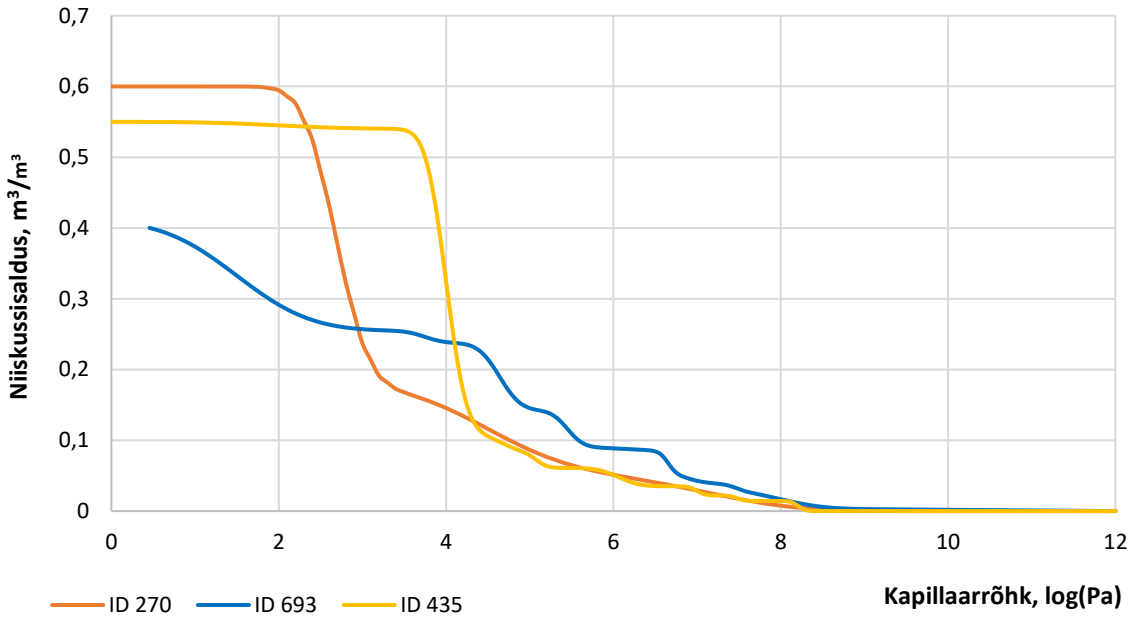
Joonis 5.12 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus punktis L2 kolme erineva krohviga

Joonis 5.13 on toodud võrdluses olevate puitkiud soojustusplaatide veejuhtivuste võrdlus.



Joonis 5.13 Erinevate soojustusplaatide veejuhtivuse võrdlus

Joonis 5.14 on toodud võrdluses olevate puitkiud soojustusplaatide veemahtuvuse võrdlus.



Joonis 5.14 Erinevate soojustusplaatide veemahtuvuse võrdlus

Tabel 5.1 Võrreldavate soojustusmaterjalide ehitusfüüsikalised omadused. Lõplikus arvutusmudelis kasutatud materjal tähistatud kollasega.

Parameeter	**ID 270**	**ID 435**	**ID 693**
Kuiva materjali soojuserijuhtivus λ [W/(m*K)]	0.042	0.050	0.039
Veeimavuse tegur A_w [kg/(m²*s$^{0.5}$)]	0.070	0.012	0.003
Veeauru difusiooni-takistustegur μ	3.0	5.0	3.5
Kuiva materjali tihedus ρ [kg/m³]	150	240	161
Poorsus [m³/m³]	0.981	0.712	0.893

Tabel 5.2 Võrreldavate krohvide ehitusfüüsikalised omadused. Lõplikus arvutusmudelis kasutatud materjal tähistatud kollasega.

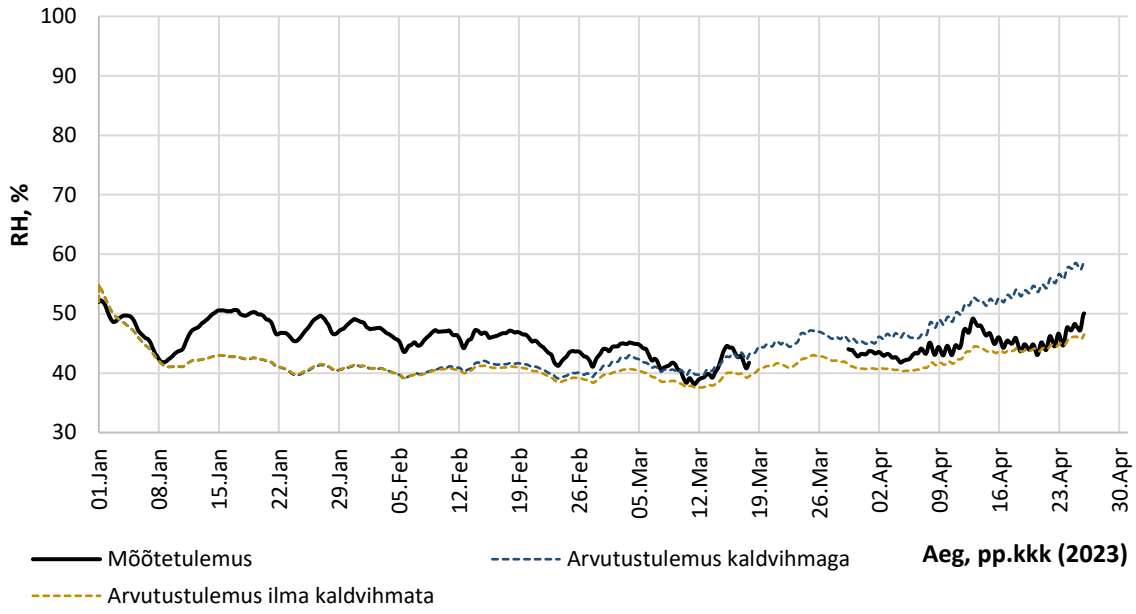
Parameeter	ID 145	ID 655	ID 840
Kuiva materjali soojuserijuhtivus λ [W/(m*K)]	0.550	0.540	0.282
Veeimavuse tegur A_w [kg/(m^2*s$^{0.5}$)]	0.0093	0.0236	0.1420
Veeauru difusiooni-takistustegur μ	12.0	13.2	11.1
Kuiva materjali tihedus ρ [kg/m^3]	1270	1248	1249
Poorsus [m^3/m^3]	0.500	0.530	0.529

5.1.1.3 Valitud arvutusmudel

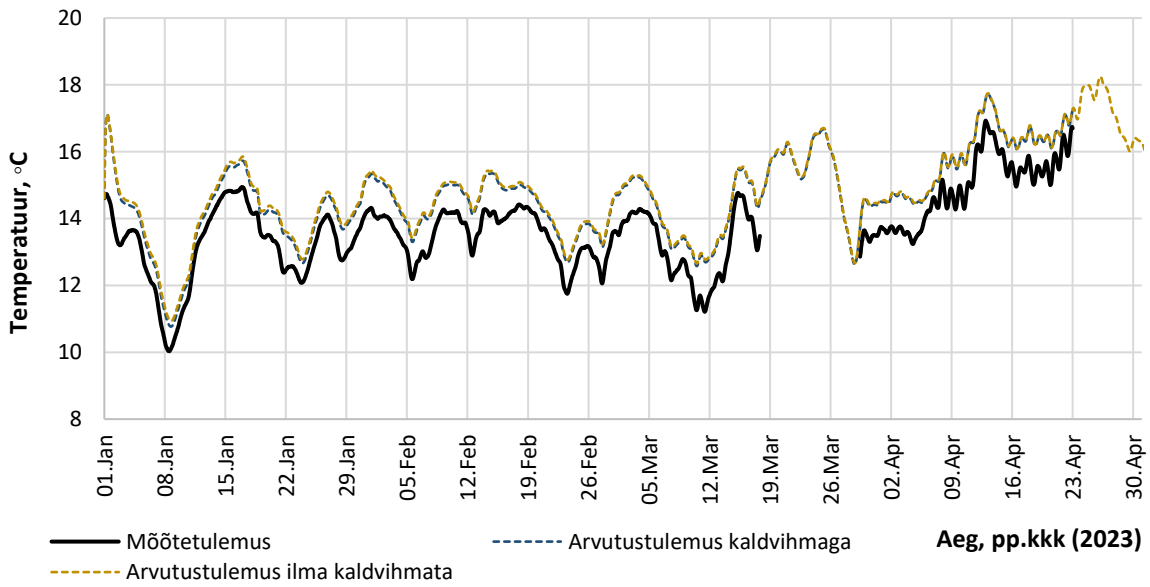
Mõõtetulemustele kõige ligilähedasema tulemuse annab arvutusmudel, mis kasutab soojustusena Delphini andmebaasi puitkiudplaati ID 270. Ilma kaldvihmata koostatud mudeliga andis väga lähedase tulemuse STEICO toode ID 693, mille korral CLT paneeli ja soojustuse vaheline suhteline õhuniiskus järgis täpselt sama trendi, mida näitasid mõõtetulemused. Kaldvihma lisamisel näitas aga materjal võrreldes kasutatud soojustusega tunduvalt suuremat veeimavust ning suhteline õhuniiskus tõusis väga kõrgele. Samasugust tulemust näitasid ka teised andmebaasis leiduvad puitkiudplaadid. Niiskustehniliselt oli ainsaks erandiks ID 270, mille korral suhtelise niiskuse tulemused jäid kogu ristlõike ulatuses samasse suurusjärku mõõtetulemustega. Krohvide võrdlus suuri erinevusi ei näidanud. Peamine erinevus kajastus krohvi taguse suhtelise õhuniiskuse väärtuses ja ajahetkes, millal näitaja alla 100% langeb.

Joonis 5.15 on toodud katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel nii kaldvihmaga kui ka ilma. Kaldvihmata arvutusmudeli tulemused erinevad mõõtetulemustest keskmiselt 3.6 % võrra, kaldvihma ja päikesekiirguse lisamisel tõusis keskmine erinevus 3.96 % peale. Seejuures võib tulemuste võrdlusest järeldada, et lõplik arvutusmudel on tegelikkusega võrreldes pessimistlikum. Temperatuuri väärtuse samas punktis on toodud Joonis 5.16.

Kaldvihma ja päikesekiirguse lisamine temperatuuri märgatavalt ei mõjuta. Arvutustulemused on läbivalt veidi kõrgemad kui mõõtetulemused, keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 0.77 °C.



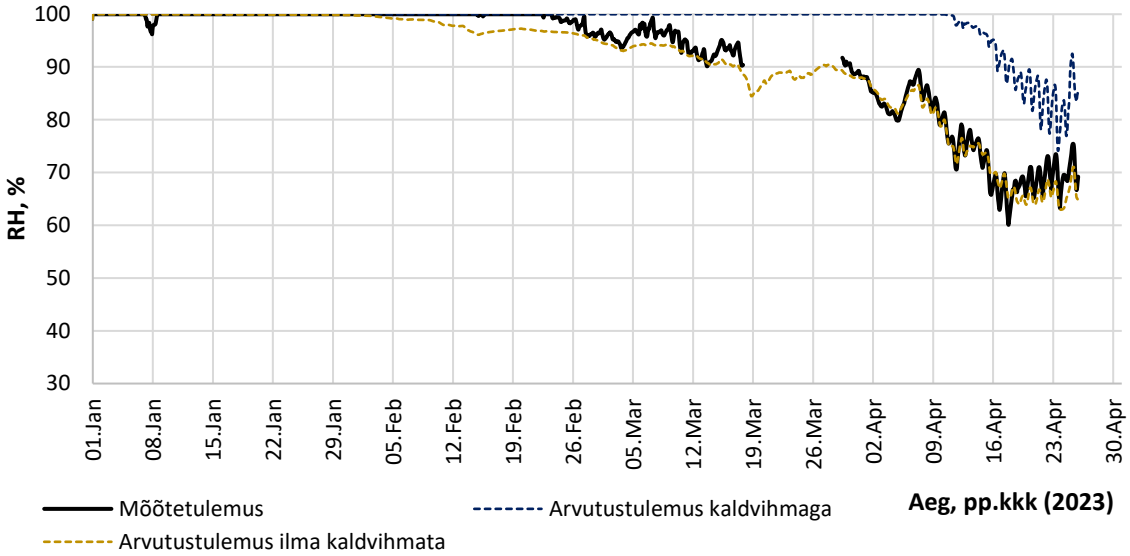
Joonis 5.15 Seina 4.1 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel



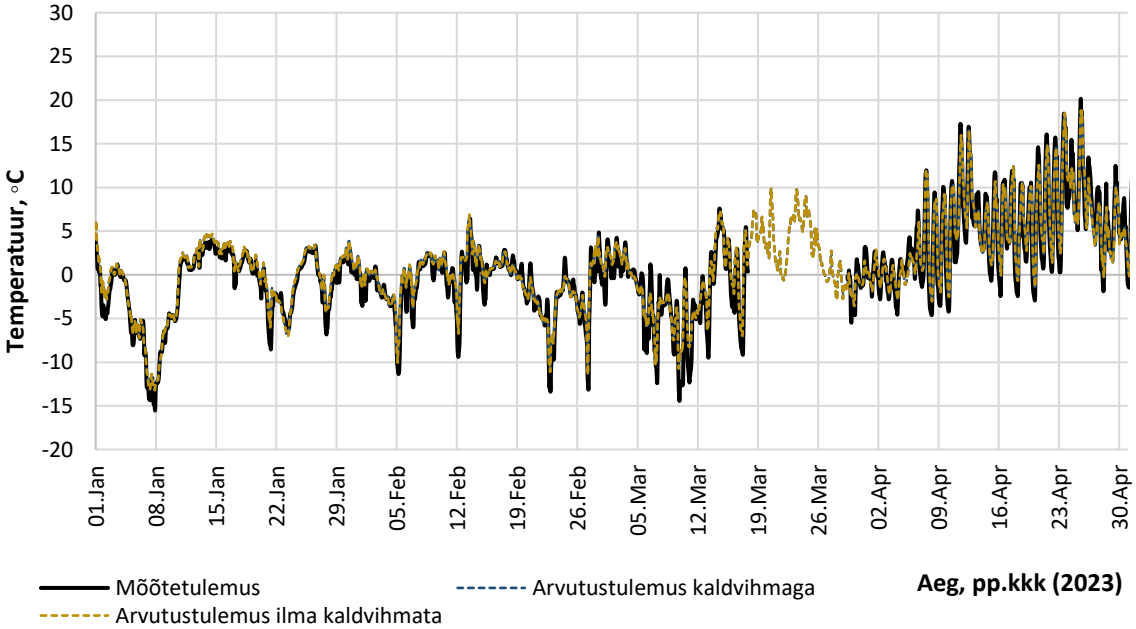
Joonis 5.16 Seina 4.1 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel

Joonis 5.17 on toodu katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel nii kaldvihmaga kui ka ilma. Kaldvihmata arvutusmudeli tulemused erinevad mõõtetulemustest keskmiselt 1.21 % võrra, kaldvihma ja päikesekiirguse lisamisel tõusis keskmine erinevus 4.9 % peale. Peamine erinevus

graafikute vahel tuleneb krohvi kuivamise perioodist. Seejuures võib tulemuste võrdlusest järeldada, et lõplik arvutusmudel on tegelikkusega võrreldes pessimistlikum, kuna krohvi tagune niiskussisaldus on pikemalt kõrge. Temperatuur samas punktis on toodud Joonis 5.18. Ilma päikesekiirguseta on temperatuuri kõikumine veidi väiksem, kuid märgatavalt kaldvihma ja päikesekiirguse lisamine temperatuuri ei mõjuta. Arvutustulemused kattuvad enamjaolt mõõtetulemustega, keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 0.44 °C.



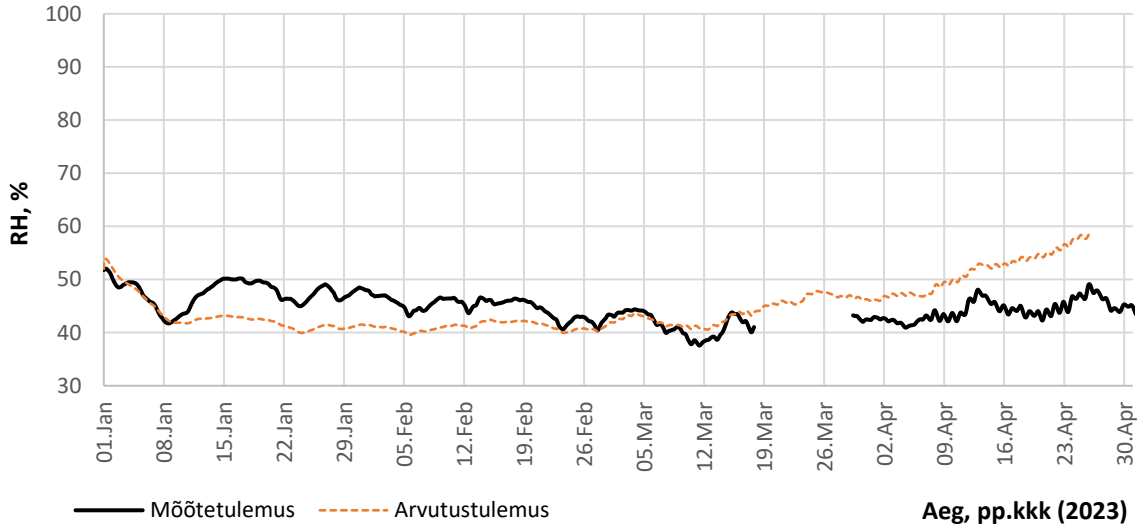
Joonis 5.17 Seina 4.1 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel



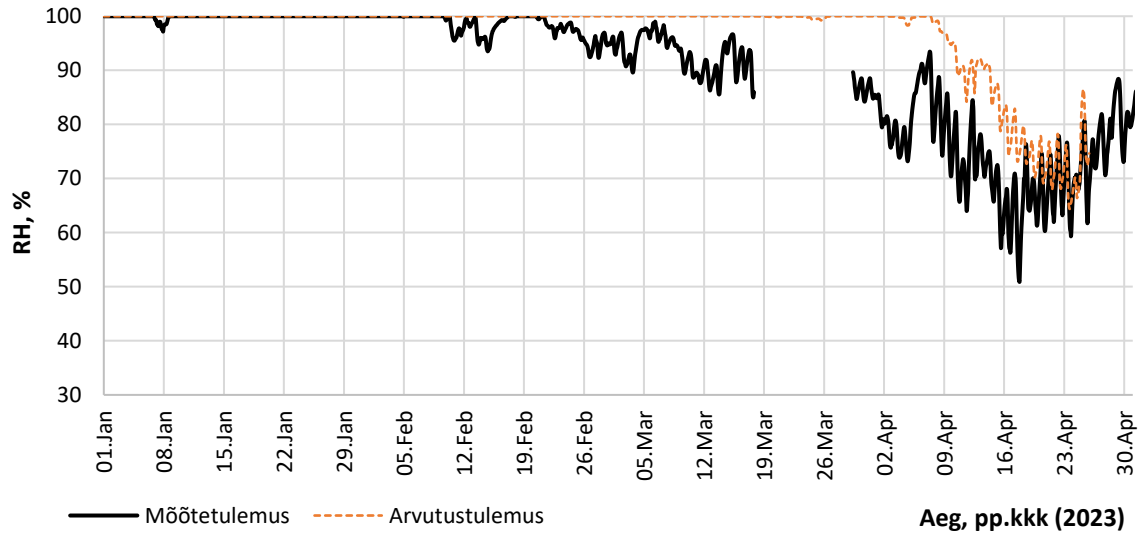
Joonis 5.18 Seina 4.1 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

5.1.2 Katseseina 4.2 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Katseseinade 4.2-4.5 arvutamisel kasutati referetsseina abil saadud arvutusmudelit, mis vihmalekke määramiseks muudeti 2D arvutuseks. Katseseina 4.2 arvutusmudelis määrati vihmaleke sarnaselt läbi viidud katsele krohvi ja soojustuse vahele. Sarnaselt mõõtetulemustele ei näidanud ka arvutustulemused märgatavat vihmlekke mõju mõõdetavatele väärtustele. Saadud katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.19. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.04%. Suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.20. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.63%.

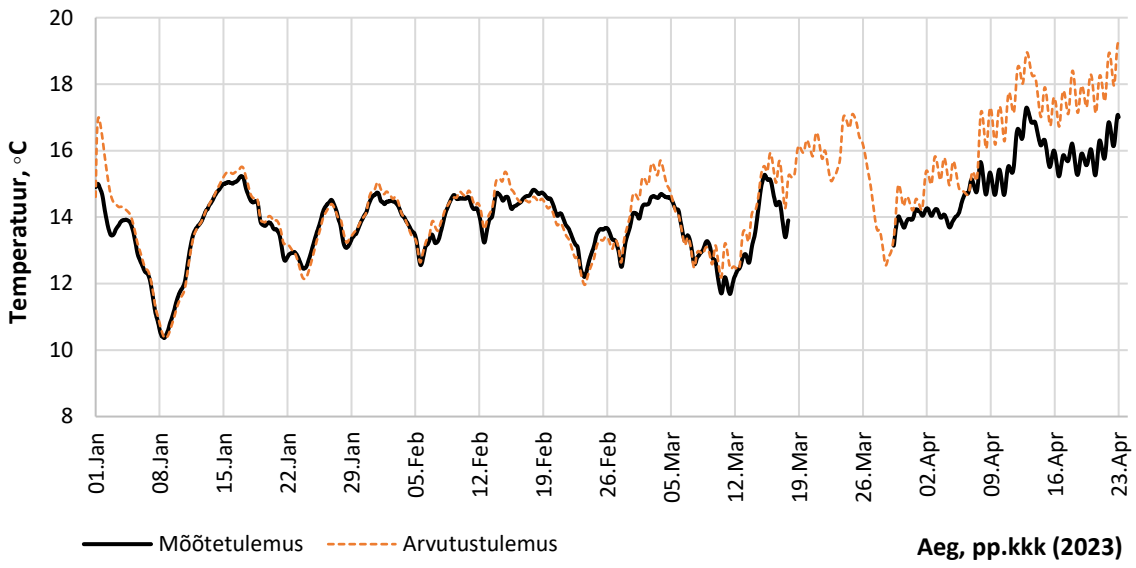


Joonis 5.19 Seina 4.2 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel

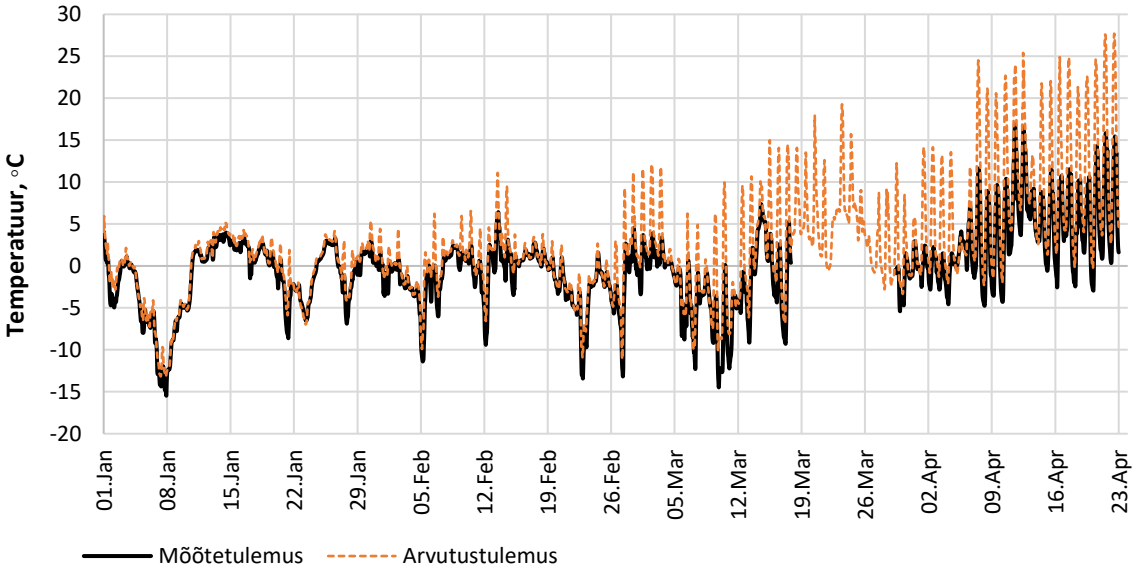


Joonis 5.20 Seina 4.2 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

Katseseina 4.2 katselised ja arvutuslikud temperatuuri väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.21. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 0.55 °C. Temperatuuri väärtused punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.22. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 1.35 °C.



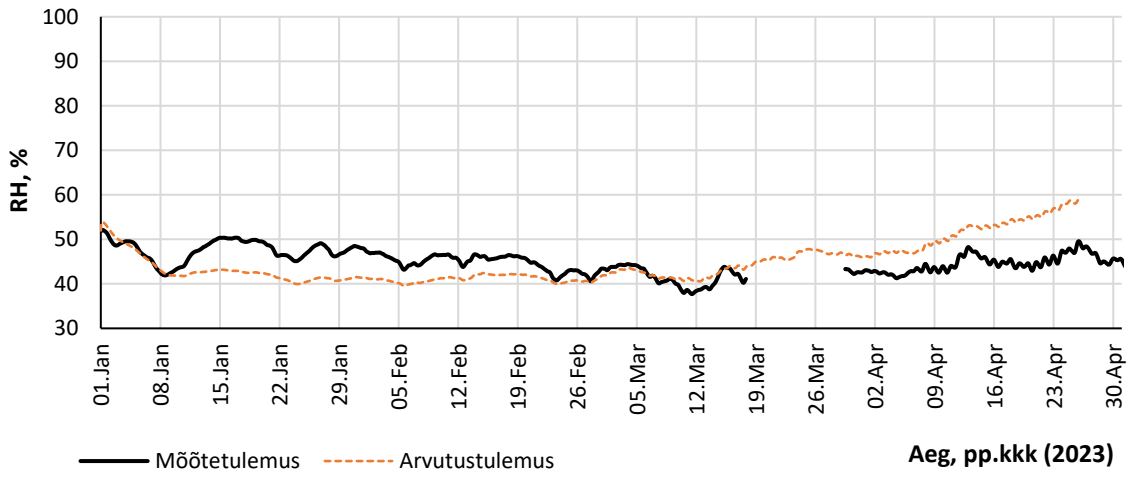
Joonis 5.21 Seina 4.2 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel



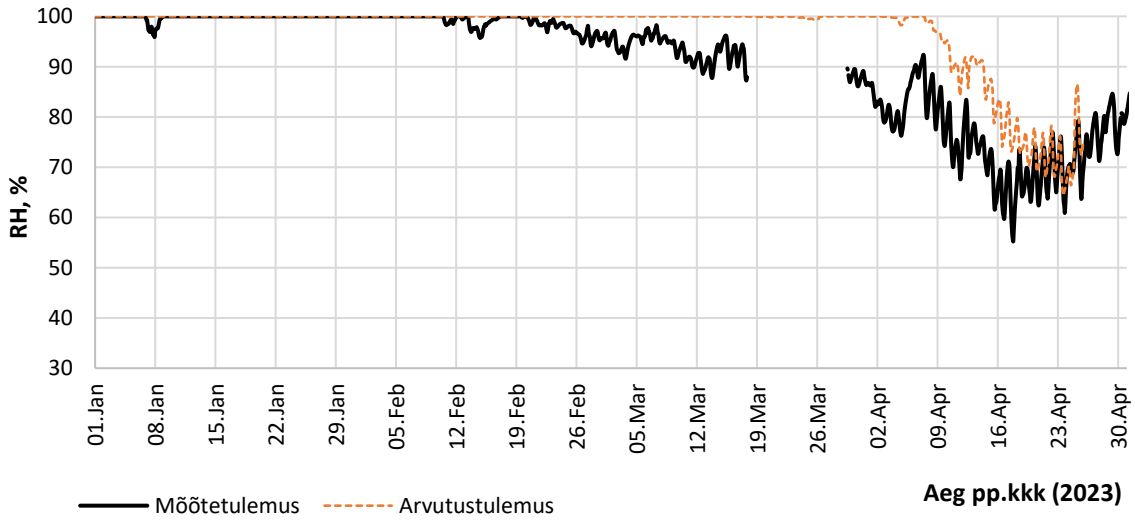
Joonis 5.22 Seina 4.2 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

5.1.3 Katseseina 4.3 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Katseseina 4.3 arvutusmudelis määrati vihmaleke sarnaselt läbi viidud katsele CLT paneeli ja soojustuse vahele. Sarnaselt mõõtetulemustele ei näidanud ka arvutustulemused märgatavat vihmlekke mõju mõõdetavatele väärtustele. Katselised ja arvutuslikud suhtelise niiskuse väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.23. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.02%. Suhtelise niiskuse väärtused punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.24. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.10%.

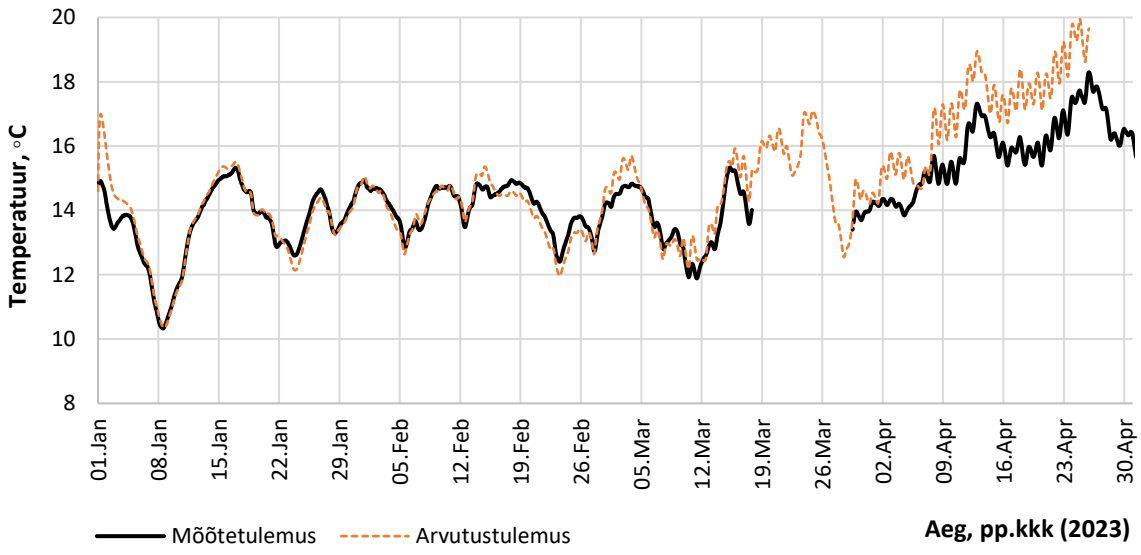


Joonis 5.23 Seina 4.3 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel

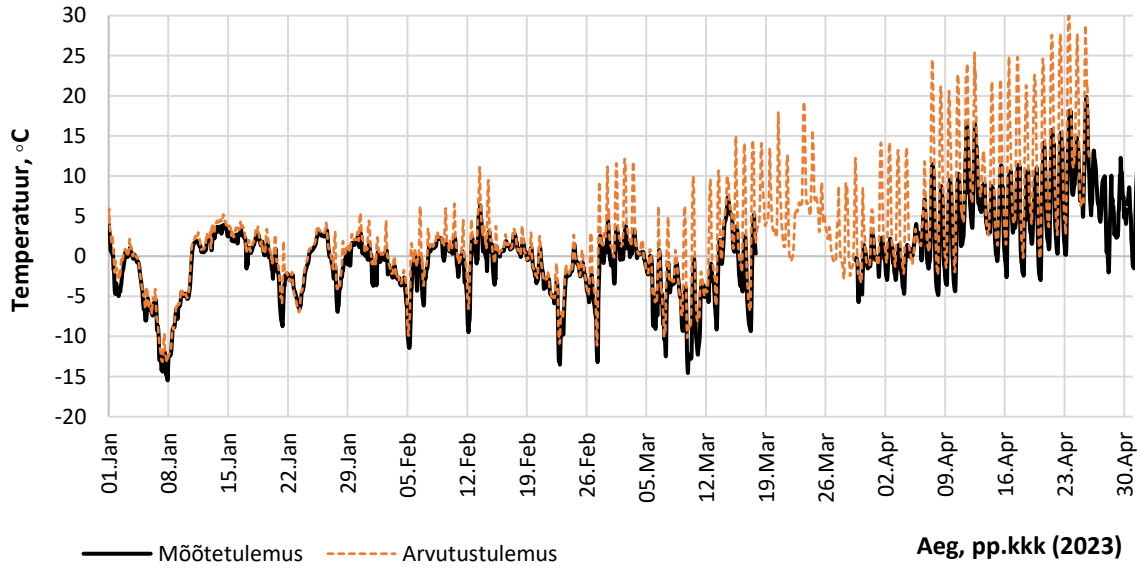


Joonis 5.24 Seina 4.3 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

Katseseina 4.3 katselised ja arvutuslikud temperatuuri väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel on toodud Joonis 5.25. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 0.50 °C. Temperatuuri väärtused punktis L2 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.26. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 1.30 °C.



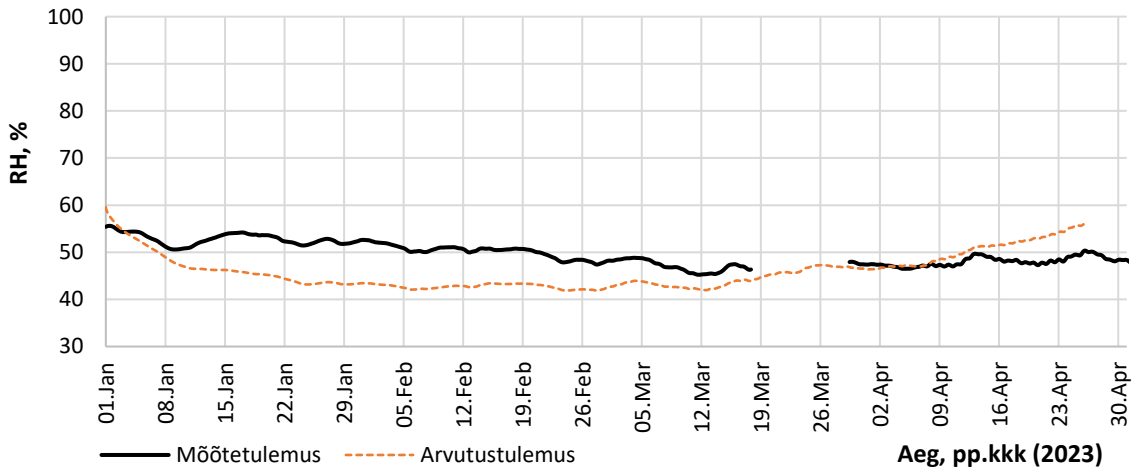
Joonis 5.25 Seina 4.3 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel



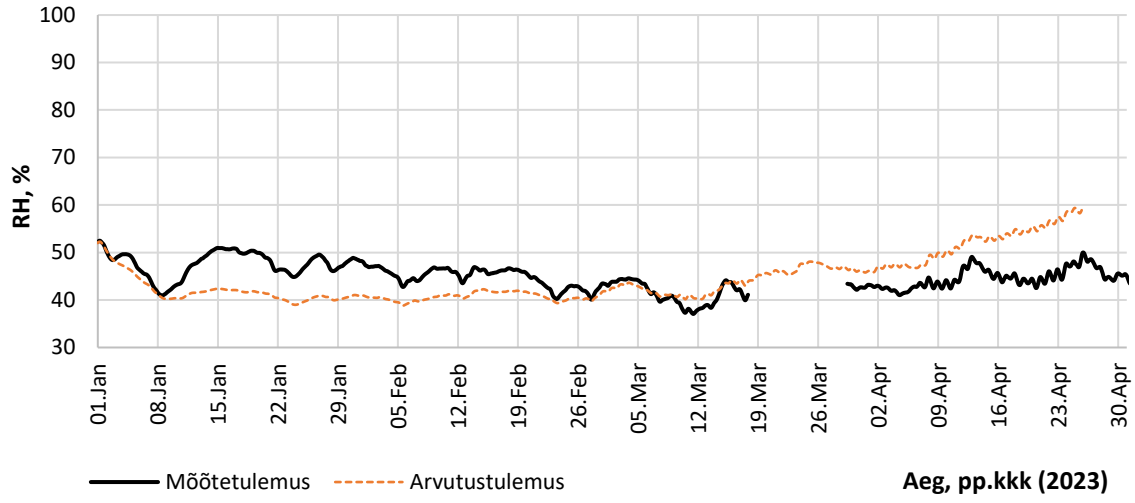
Joonis 5.26 Seina 4.3 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

5.1.4 Katseseina 4.4 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

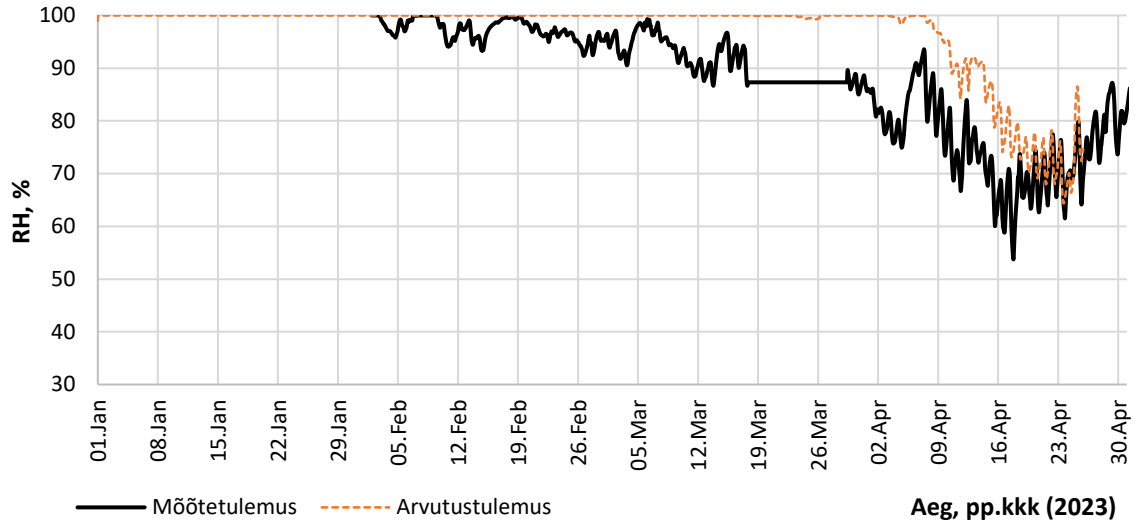
Katseseina 4.4 arvutusmudelis määrati vihmaleke sarnaselt läbi viidud katsele soojustuse ja krohvi vahele. Sarnaselt mõõtetulemustele ei näidanud ka arvutustulemused märgatavat vihmlekke mõju mõõdetavatele väärtustele. Katseseina 4.4 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel seespool aurutõket on toodud Joonis 5.27. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.66%. Suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L2 CLT paneeli ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket on toodud Joonis 5.28. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.39%. Suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L3 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.29. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 5.77%.



Joonis 5.27 Seina 4.4 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel seespool aurutõket

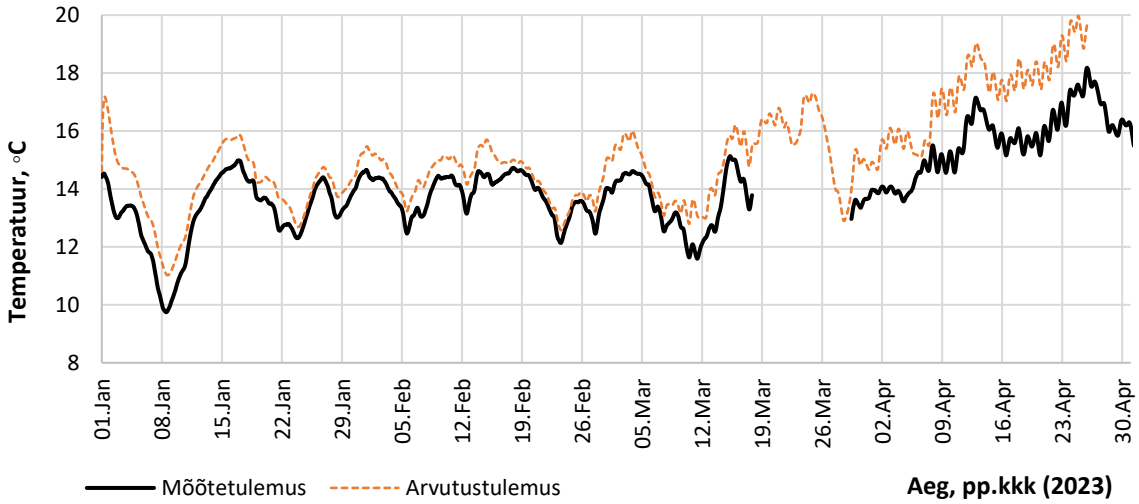


Joonis 5.28 Seina 4.4 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket

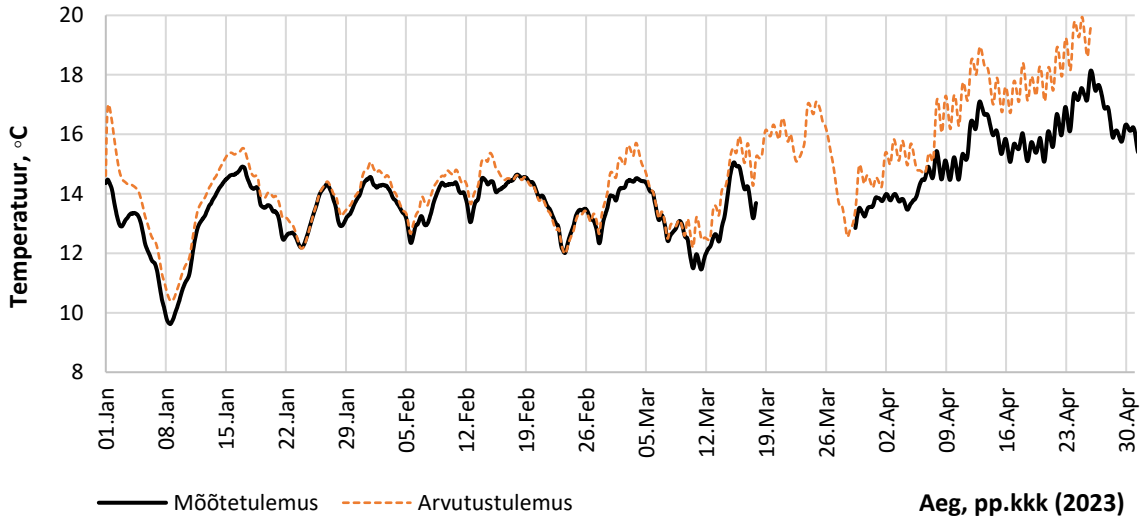


Joonis 5.29 Seina 4.4 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

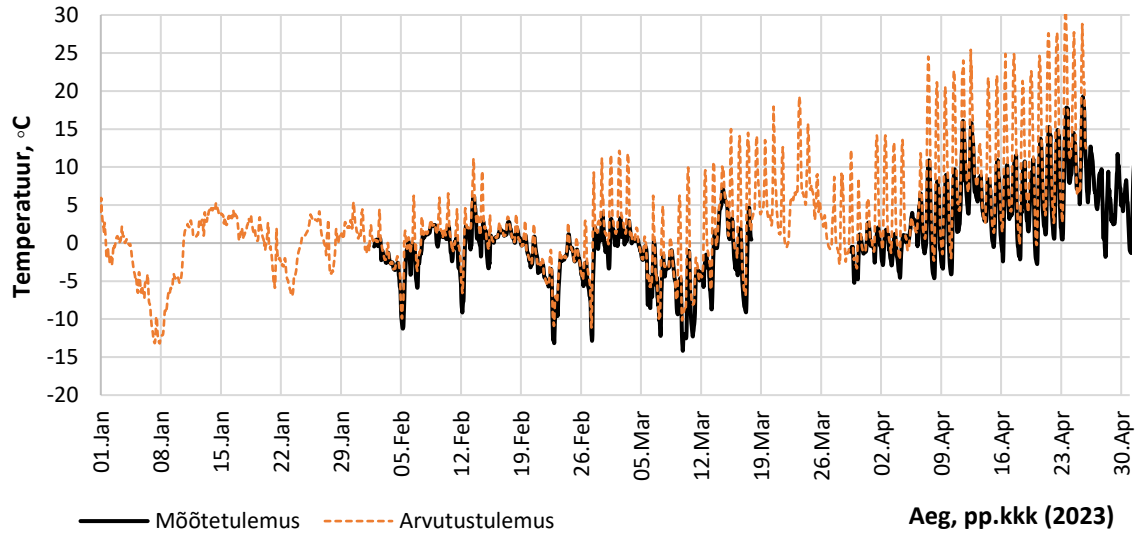
Katseseina 4.4 katselised ja arvutuslikud temperatuuri väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel seespool aurutõket on toodud Joonis 5.30. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 0.98 °C. Temperatuuri väärtused punktis L2 CLT paneeli ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket on toodud Joonis 5.31. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 0.74 °C. Temperatuuri väärtused punktis L3 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.32. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 1.27 °C.



Joonis 5.30 Seina 4.4 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel seespool aurutõket



Joonis 5.31 Seina 4.4 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket

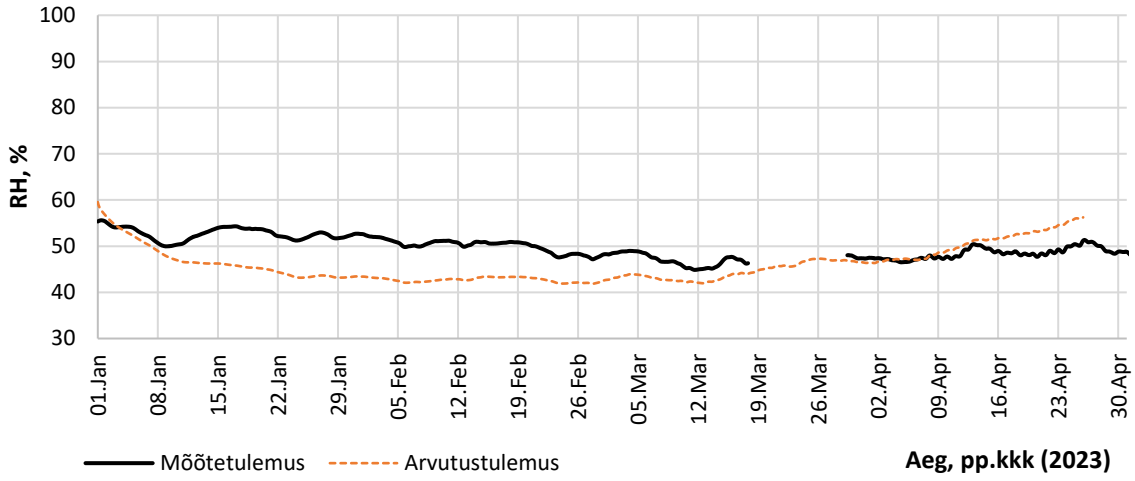


Joonis 5.32 Seina 4.4 temperatuuri mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

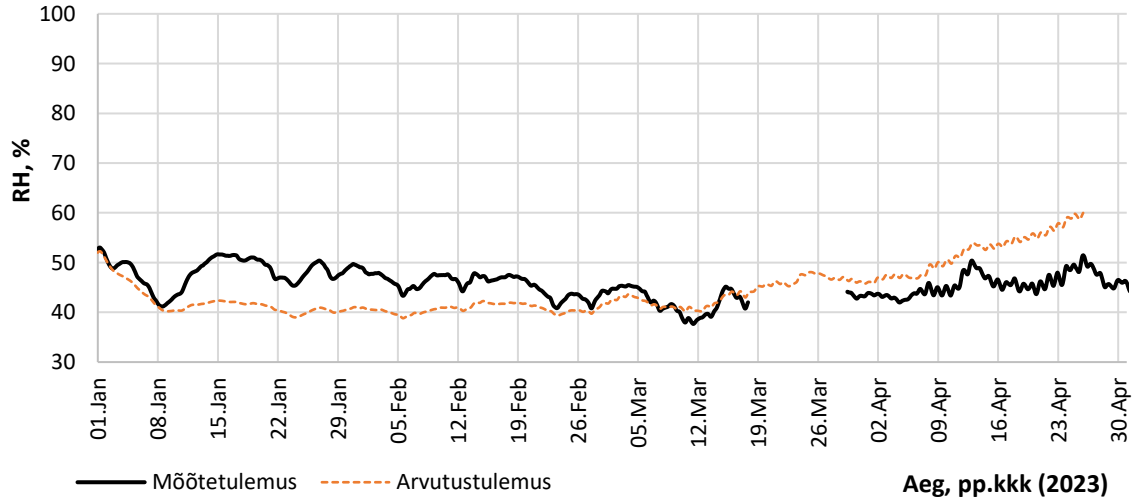
5.1.5 Katseseina 4.5 mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Katseseina 4.5 arvutusmudelis määrati vihmaleke sarnaselt läbi viidud katsele soojustuse ja krohvi vahele väljaspoole aurutõket. Sarnaselt mõõtetulemustele ei näidanud ka arvutustulemused märgatavat vihmlekke mõju mõõdetavatele väärtustele. Katseseina 4.5 katselised ja arvutuslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel seespool aurutõket on toodud Joonis 5.33. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.57 %. Suhtelise õhuniiskuse väärtused

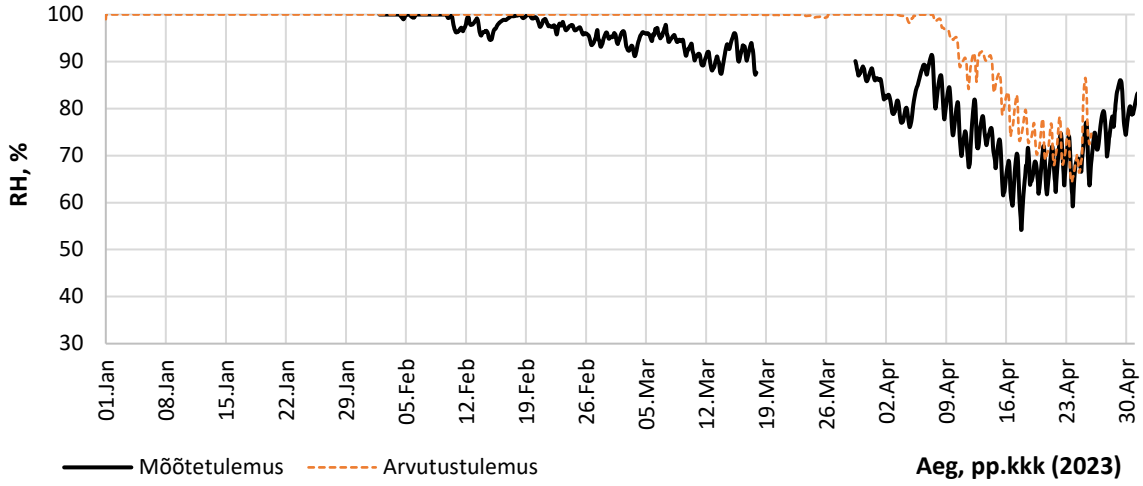
punktis L2 CLT paneeli ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket on toodud Joonis 5.34. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.51 %. Suhtelise õhuniiskuse väärtused punktis L3 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.35. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 4.42 %.



Joonis 5.33 Seina 4.5 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel seespool aurutõket

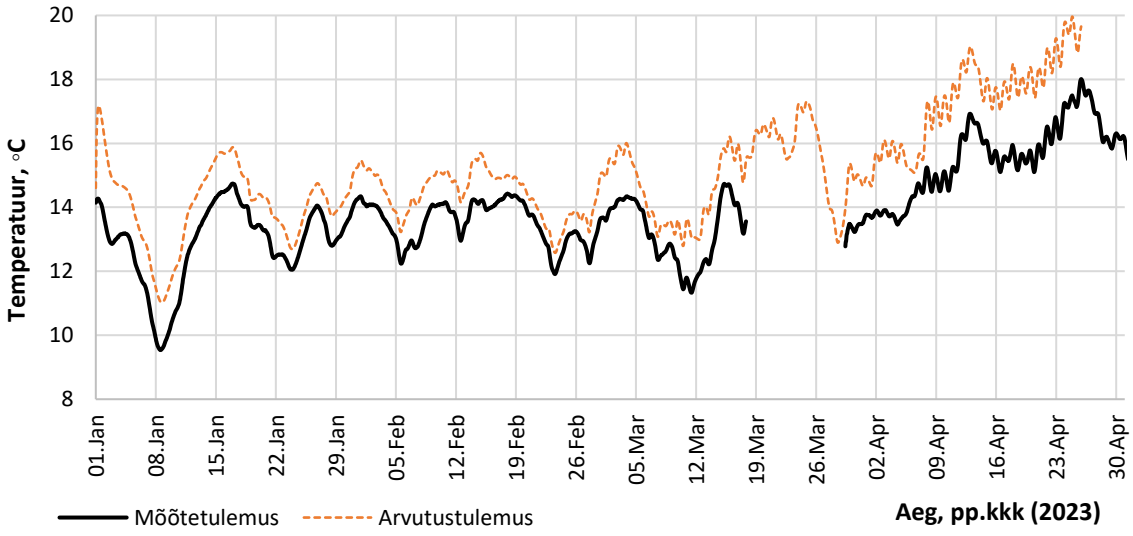


Joonis 5.34 Seina 4.5 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket

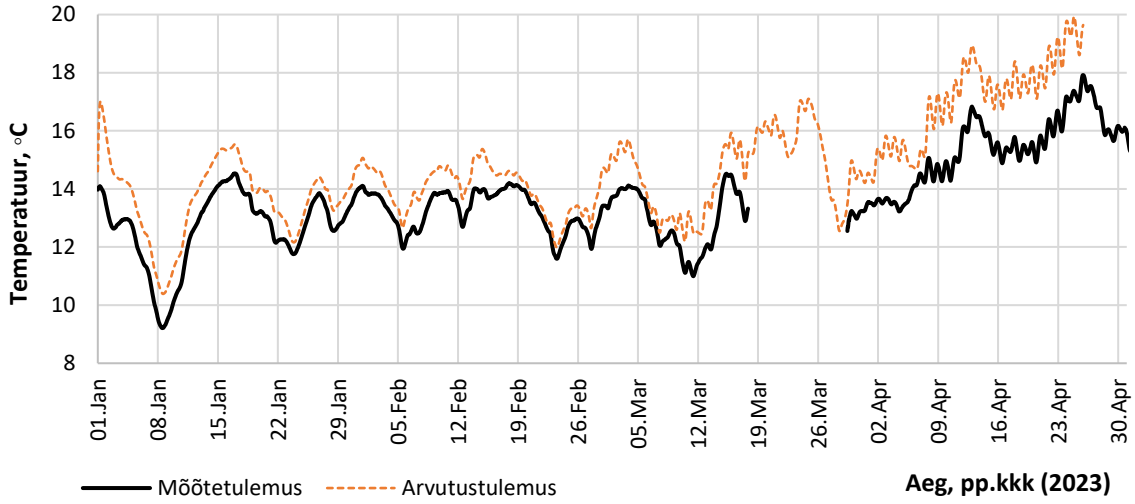


Joonis 5.35 Seina 4.5 suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

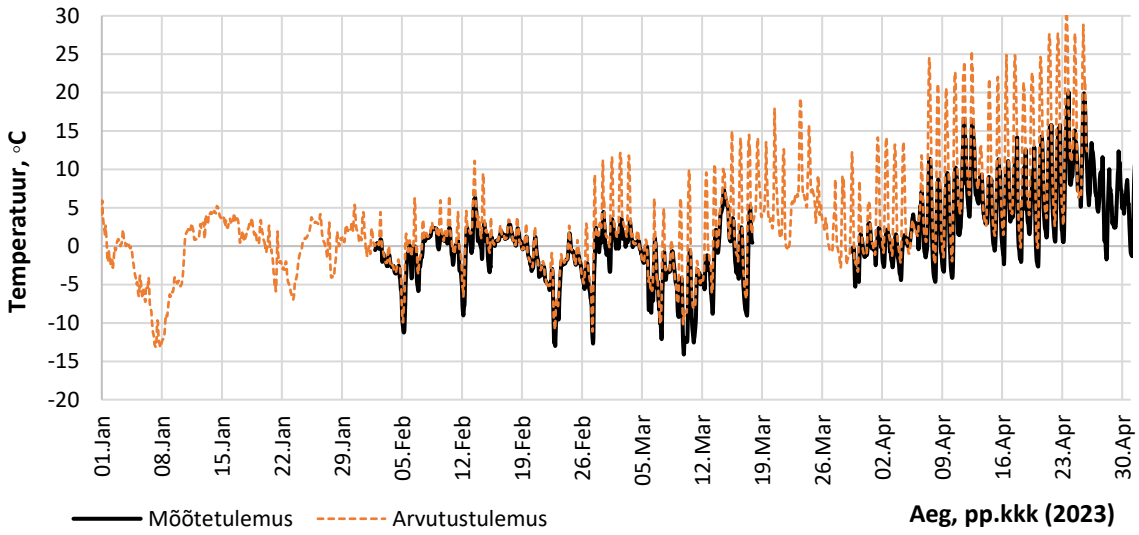
Katseseina 4.5 katselised ja arvutuslikud temperatuuri väärtused punktis L1 CLT paneeli ja soojustuse vahel seespool aurutõket on toodud Joonis 5.36. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 1.20 °C. Temperatuuri väärtused punktis L2 CLT paneeli ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket on toodud Joonis 5.37. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 1.07 °C. Temperatuuri väärtused punktis L3 soojustuse ja krohvi vahel on toodud Joonis 5.38. Keskmine erinevus mõõte- ja arvutustulemuste vahel on 1.23 °C.



Joonis 5.36 Seina 4.5 temperatuur mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel seespool aurutõket



Joonis 5.37 Seina 4.5 temperatuur mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT ja soojustuse vahel väljaspool aurutõket

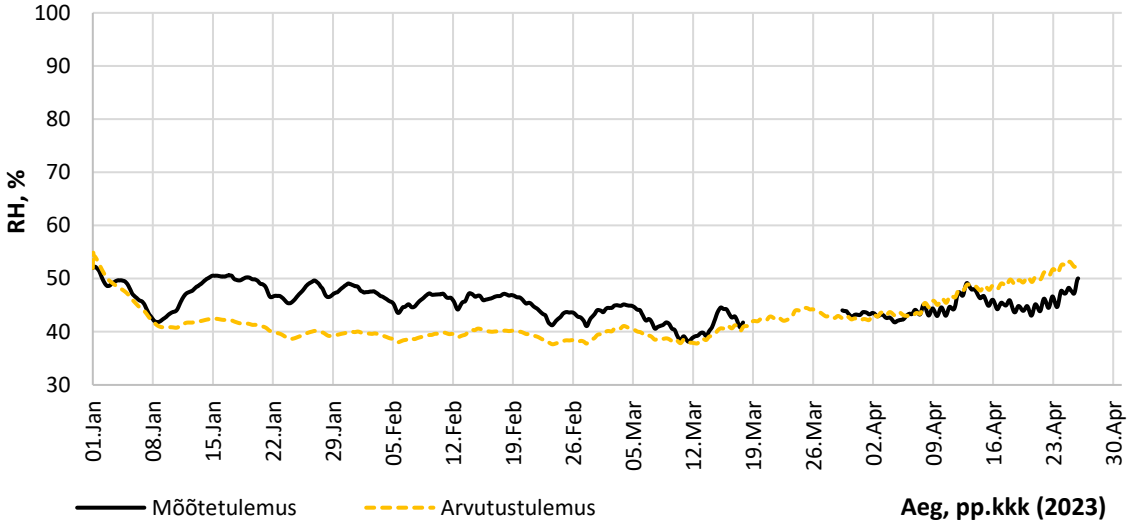


Joonis 5.38 Seina 4.5 temperatuur mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus soojustuse ja krohvi vahel

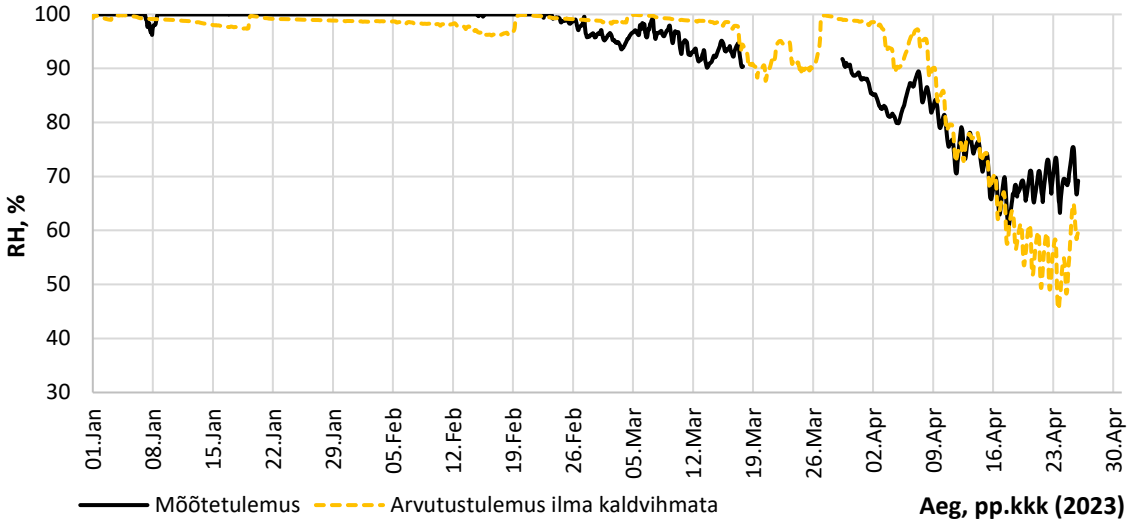
5.1.6 Vähendatud veeimavuse teguriga krohv

Arvutustarkvara Delphine materjalide andmebaasis olevate krohvide arvutusmudelis kasutamise asjakohasuse hindamiseks muudeti kasutatud krohvi omadusi, et sellega teostada testarvutus. Koostatud arvutusmudeli suure veeimavuse tõttu vähendati krohvi veeimavuse tegurit A_w. Väärtust langetati 10 korda (A_w = 0.0093 -> A_w = 0.00093) ning teostati arvutus aurutõkketa ristlõikele testperioodi kliimaandmetega. Saadud suhtelise õhuniiskuse tulemuste võrdlus mõõtetulemustega erinevates seina

kihtides on toodud Joonis 5.39 ja Joonis 5.40. Tulemustest märgatavat erinevust võrreldes eelnevate arvutustega ei kajastu.



Joonis 5.39 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus CLT paneeli ja soojustuse vahel



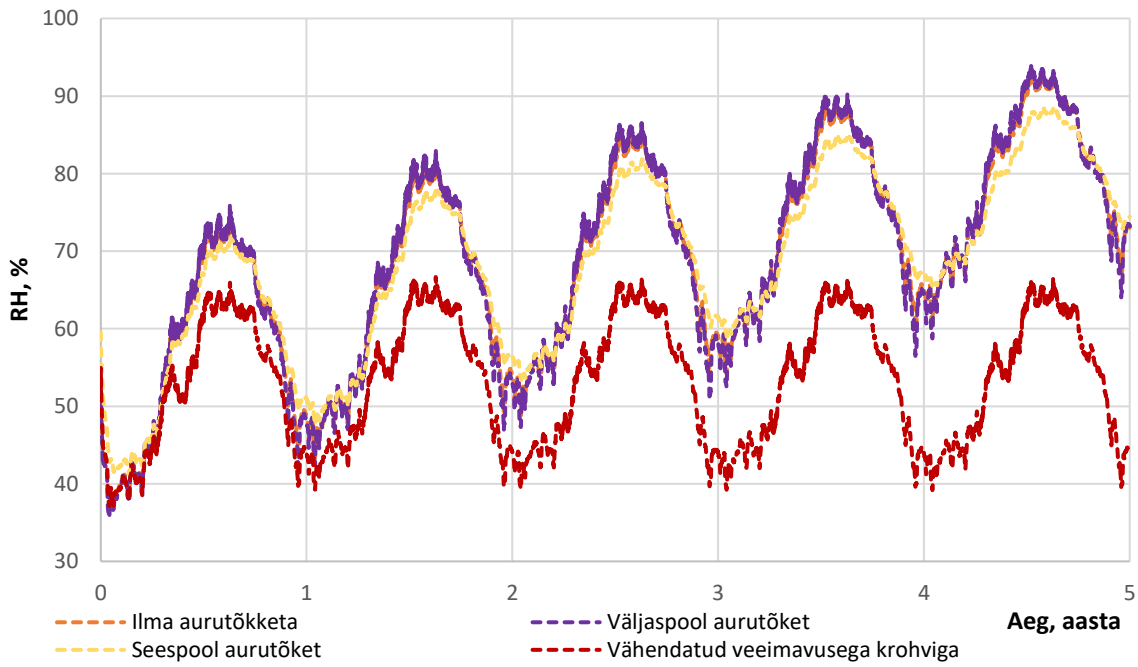
Joonis 5.40 Suhtelise õhuniiskuse mõõte- ja arvutustulemuste võrdlus krohvi ja soojustuse vahel

5.2 Välisseinte soojus- ja niiskustehniline toimivus

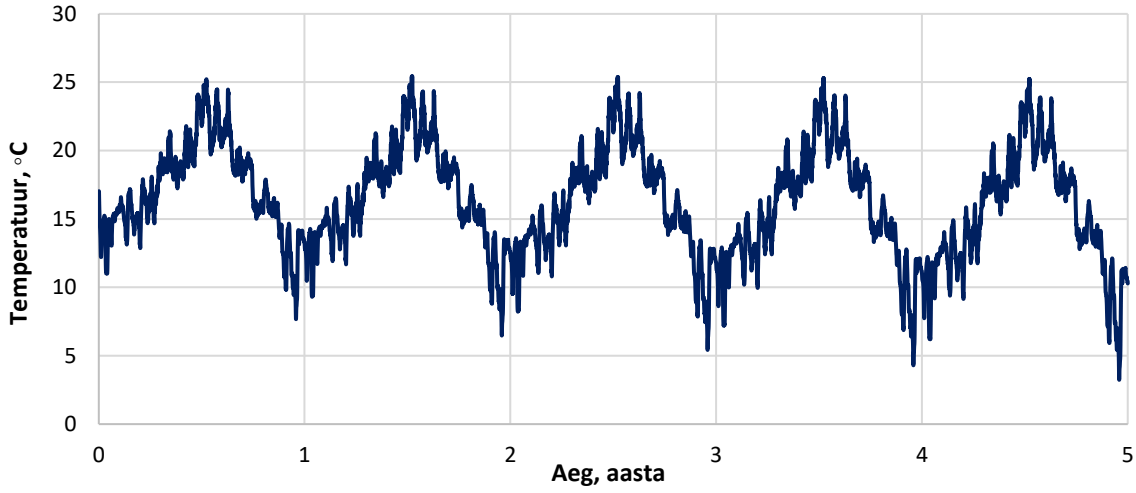
Mõõtetulemustest kajastub, et CLT paneeli pinnal hallituse ohtu ei tekkinud. Kõigis ristlõigetes jäi puidu ja soojustuse vahelises kihis fikseeritud suhteline õhuniiskus terve perioodi vältel alla 60 %. Kuna mõõteperiood ei kestnud piisavalt pikalt, et ainult nende tulemuste põhjal lõplikku hinnangut anda, teostatakse valideeritud mudeliga ka arvutus kasutades hallituse testaastat. Arvutuse pikkuseks on viis aastat, et hinnata tarindi pikaajalist toimivust.

5.2.1 Suhteline õhuniiskus ja temperatuur

Joonis 5.41 on toodud arvutusmudeliga saadud tarindi suhteline õhuniiskus CLT paneeli ja soojustuse vahel erinevate ristlõigetega viie aasta jooksul kasutades hallituse testaasta kliimaandmeid. Temperatuur samas kihis on toodud Joonis 5.42.



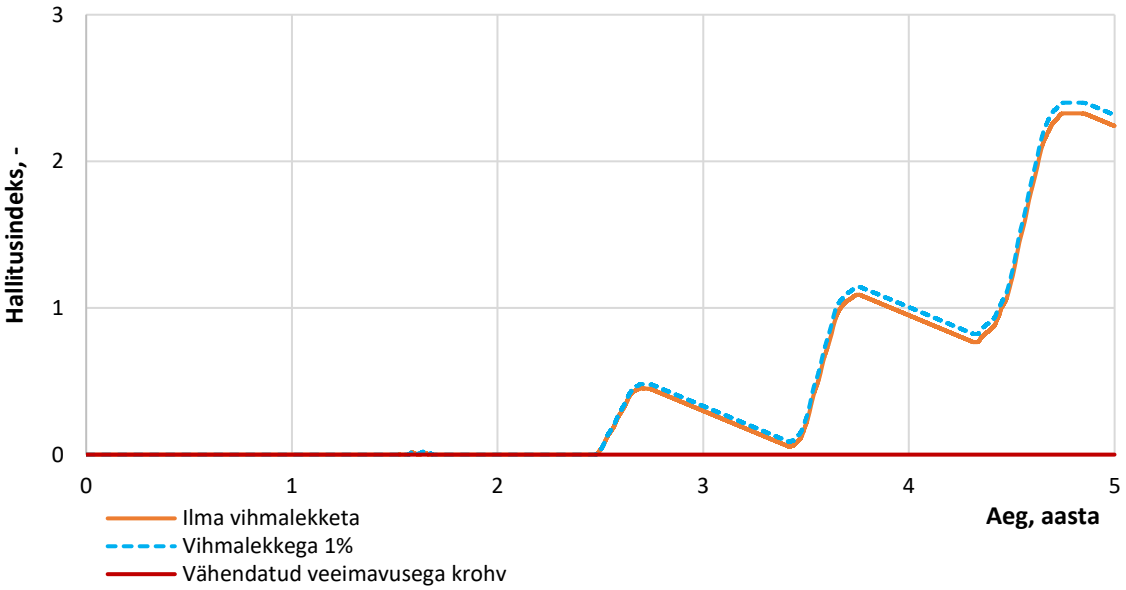
Joonis 5.41 Suhteline õhuniiskus tarindis CLT paneeli ja soojustuse vahel arvutusmudeli kohaselt hallituse testaastaga



Joonis 5.42 Temperatuur tarindis CLT paneeli ja soojustuse vahel arvutusmudeli kohaselt hallituse testaastaga

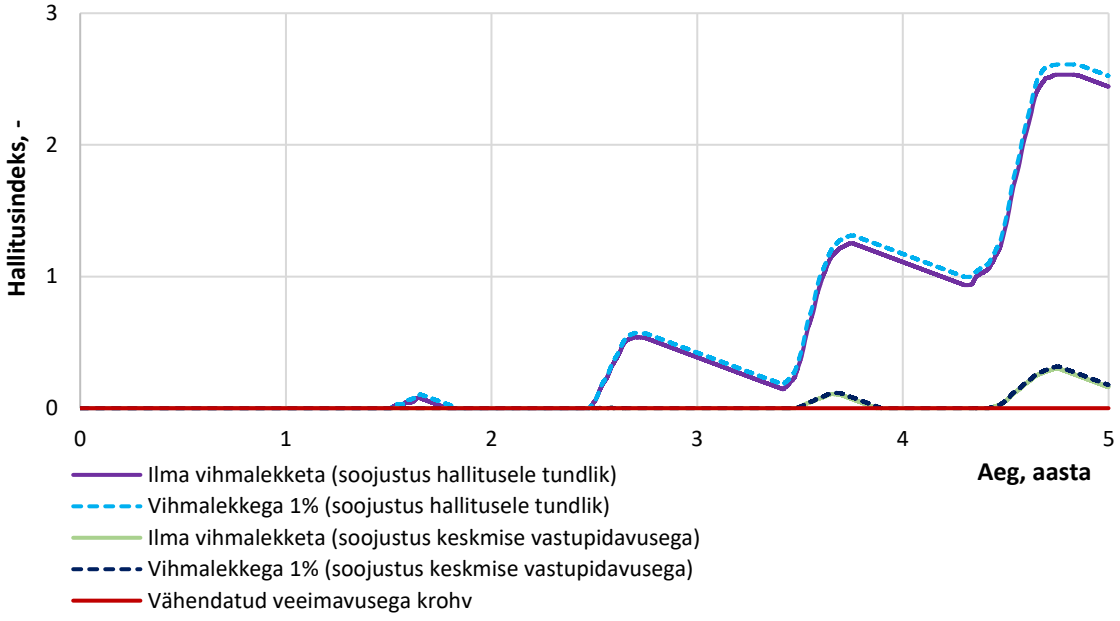
5.2.1.1 Hallitusriski hindamine

Saadud suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuri väärtuste abil arvutati välisseina lahendusele hallituse riski hindamiseks hallitusindeks. Lisaks tavapärasele hallitusindeksile arvutati välja ka väärtus 1%-lise vihmalekke esinemise korral CLT paneeli ja soojustuse vahel, et hinnata selle mõju ristlõike niiskusetehnilisele toimimisele. Aurutõkkega ristlõikes määrati leke aurutõkkest väljapoole. Joonis 5.43 on toodud arvutusmudeliga saadud ilma aurutõkketa tarindi hallitusindeks CLT paneeli ja soojustuse vahel viie aasta jooksul ilma vihmalekketa ja 1% vihmalekke esinemise korral. Vihmaleke tõstab hallitusindeksi väärtust tarindis 3.13%.

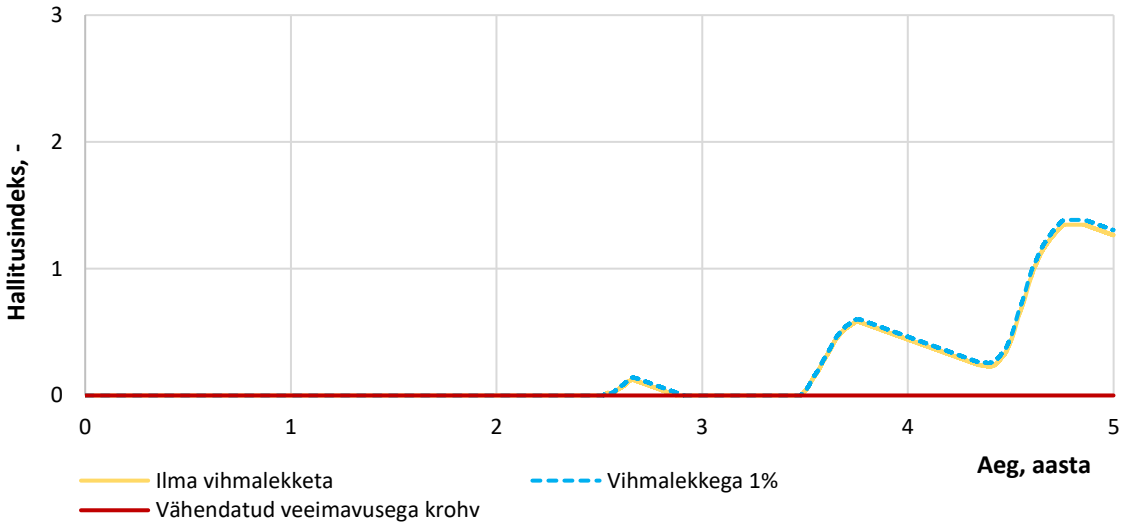


Joonis 5.43 Ilma aurutõkketa tarindi hallitusindeksi võrdlus CLT paneeli ja soojustuse vahel ilma vihmalekketa ja vihmalekkega 1%

Joonis 5.44 on toodud arvutusmudeliga saadud aurutõkkega tarindi hallitusindeks väljaspool aurutõket viie aasta jooksul ilma vihmalekketa ja 1% vihmalekke esinemise korral. Arvutus on teostatud kahel viisil - ühel juhul on arvestatud puitkiudplaat hallituse suhtes tundlikuks materjaliks, teisel keskmise vastupidavusega materjaliks. Vihmaleke tõstab hallitusindeksi väärtust väljaspool aurutõket esimesel juhul 3.09%, teisel 4.46%. Hallitusindeksi väärtus seespool aurutõket on toodud Joonis 5.45, puidu pinnal tõuseb näitaja 2.81%.

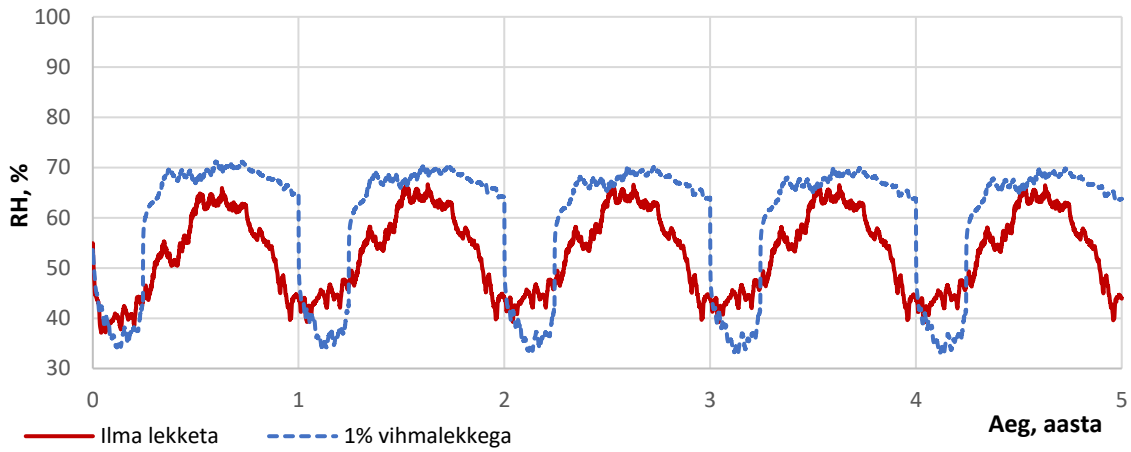


Joonis 5.44 Aurutõkkega tarindi hallitusindeksi võrdlus väljaspool aurutõket ilma vihmalekketa ja lekkega 1% kahel juhul : 1) soojustus on hallituse suhtes tundlik; 2) soojustus on keskmise vastupidavusega materjal



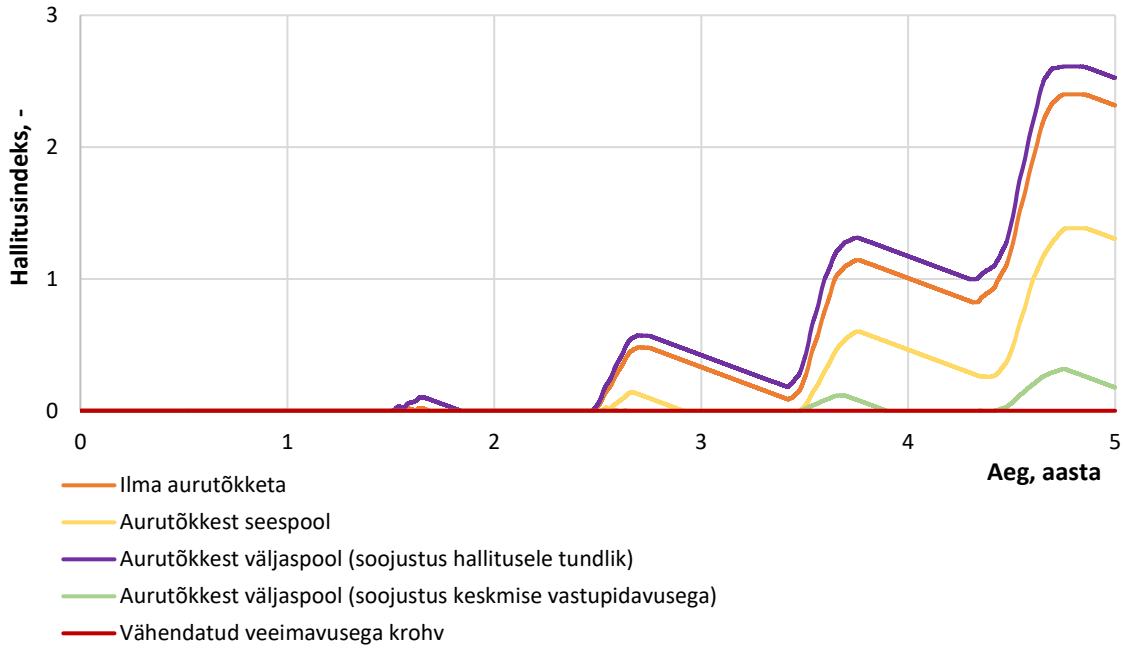
Joonis 5.45 Aurutõkkega tarindi hallitusindeksi võrdlus seespool aurutõket ilma vihmalekketa ja vihmalekkega 1%

Vähendatud veeimavuse teguriga krohviga arvutusmudel näitab, et ilma aurutõkketa ristlõikes suhteline õhuniiskus viie aasta jooksul üle 70% ei tõuse ning niiskus ei akumuleeru. Seda ka 1%-lise vihmalekke esinemisel CLT paneeli ja soojustuse vahel (Joonis 5.46). Sellest saab järeldada, et sellise omadustega krohviga kaetud ristlõikes hallituse tekke ohtu ei ole, kui tarkvara arvestab krohvi omaduste muutust korrektselt.



Joonis 5.46 Vähendatud veeimavuse teguriga krohviga ristlõike suhteline õhuniiskus ilma aurutõkketa ristlõikes CLT paneeli ja soojustuse vahel ilma lekketa ning 1%-lise vihmalekkega

Aurutõkkega ja ilma aurutõkketa ristlõigete hallitusindeksite väärtuste võrdlus viie aasta jooksul 1% vihmalekke esinemise korral on toodud Joonis 5.47. Hallitusindeksile määratud kriteeriumite järgi ei ole välispiirde soojus- ja niiskustehniline toimivus tagatud kuna väärtus ületab seatud kriitilise piiri. Hallituse testaastaga läbi viidud arvutused näitavad viie aasta lõikes, et tekkival niiskusel ei ole võimalik tarindist lõplikult välja kuivada ning CLT paneeli ja soojustuse vahelises kihis tõuseb õhu suhteline niiskus iga aastaga. Hallitusindeks küündib ilma aurutõkketa tarindis 2.5-ni. Aurutõkkega ristlõikes jääb puidu pinnal hallitusindeksi väärtus alla 1.4. Väljaspool aurutõket tõuseb aga näitaja 2.5-ni juhul, kui soojustus arvestada hallituse suhtes tundlikuks materjaliks. Kui puitkiudplaati võib lugeda hallituse suhtes keskmise vastupidavusega materjaliks, on väärtus seatud piirides jäädes tunduvalt alla ühe.



Joonis 5.47 Aurutõkkega ja ilma aurutõkketa ristlõigete hallitusindeksi võrdlus viie aasta jooksul 1%-lise vihmalekke esinemisel

6. TULEMUSTE ANALÜÜS

Kõige enam mõjutasid arvutusmudeli tulemusi kasutatavate materjalide omadused, mis määravad käitumise kokkupuutel veega ja avaldusid kaldvihma mõjul. Nende hulka kuulusid eelkõige krohvi ja puitkiudsoojusisolatsiooni veeimavuse tegur A_w ning väiksemal määral soojustuse veeauru difusioonitakistustegur μ, mis määrasid kui kaugele niiskus ristlõikes jõuab ning kas kõrge niiskuskoormustega perioodide vahel jõuab see piisavas koguses välja kuivada. CLT paneeli ja soojustuse vahelisele suhtelise õhuniiskuse väärtusele avaldas suurt mõju ka puidu ja puitkiudplaadi algne niiskussisaldus. Krohvi taguse suhtelise niiskuse puhul mängis olulist rolli pinna suhteline difusioonitakistus S_d, mis antud olukorras sõltus krohvi katvast värvikihist. Hetkel Delphin'i andmebaasis leiduvate toodetega ei ole võimalik ilma materjalide omaduste muutmist koostada rahuldavat arvutustulemust uuritavast ristlõikest. Puitkiul põhinevatel soojustustel on liiga kõrge veeimavus, mis ei vasta tänapäevastele ETICS lahendustes kasutatavatele toodetele. Samamoodi ei leidu ka tänapäevastele krohvidele häid vasteid ja piisavalt väikse veeimavusega tooteid. Ainuke Delphin'i andmebaasis leiduv puitkiudplaat, mille veeimavus on piisav, et hoida tarkvaras olevate krohvidega suhteline õhuniiskus puidu pinnal alla 90%, on ID 270. Krohvide seas ühtegi lõplikult toimivat toodet ei leidu, kuid olemasoleva krohvi veeimavuse teguri vähendamine näitas, et soovitud tulemus võib olla teatud suurusi muutes saavutatav.

Katse- ja arvutustulemuste erinevused olid temperatuuri osas väikesed, suhtelise niiskuse puhul suuremad erinedes kuni 6 %. Viga tuleneb peamiselt soojustusena kasutatud tootele iseloomulike omadustega materjali puudumise tõttu arvutustarkvara andmebaasis. Teatud mõju võib tekkida ka mudeldamise ebatäpsusest ja asjaolust, et mudeli kalibreerimiseks kasutati suhteliselt lühikest mõõteperioodi. Võrreldes katsetulemustega annab koostatud mudel pikema perioodi peale kõrgemad suhtelise õhuniiskuse väärtuse CLT paneeli ja soojustuse vahel. Samamoodi võtab ka krohvi kuivamine mudeli kohaselt kauem aega kui mõõtetulemused näitavad ja suhteline õhuniiskus jääb enamus mõõteperioodist ligi 100% juurde. Võrdluseks võib tuua, et (Kukk, Kalamees, et al., 2022) uurimustöös mineraalvilla ja tuuletõkkega kaetud CLT paneeli kohta, ei tõusnud tuuletõkke taga suhteline õhuniiskus kordagi 100%-ni ning jäi kevadel enamasti alla 80%. Krohvi taguse suhtelise õhuniiskuse asjakohaseks hindamiseks peab teostama pikemaajalise mõõtmise kuna antud mõõteperioodil moodustas suure osa ajast krohvi ehitusjärgne kuivamine. Arvutustulemused annavad tarindi temperatuurist erinevates konstruktsiooni vahekihtides asjakohase ülevaate, suurim erinevus mõõtetulemustega on 1.35 °C. Peamine erinevus tuleneb arvutustulemuste suuremast kõikumisest krohvi taguses kihis. CLT paneeli ja soojustuse

vahel on temperatuur samuti perioodi läbivalt veidi kõrgem, kuid järgib mõõdetud tulemustega sama trendi. See näitab, et isolatsiooniplaadi soojuserijuhtivust korrigeerides, saab arvutustulemust veelgi enam optimeerida.

Arvutustulemused Delphine'i andmebaasis kasutatavate materjalidega ennustavad hallituse ohtu. Tarindisse kogunev niiskus ei saa sealt enam välja kuivada ja arvutused näitavad, et maksimaalne suhteline õhuniiskus kasvab iga aastaga. See viib järelduseni, et antud ristlõige vajab niiskustehniline toimivuse tagamiseks soojustuse tuulutust. Seda kinnitab ka (Kukk, Kalamees, et al., 2022) järelduse, et CLT paneel on tuulutatud fassaadiga välisseinas võimeline tagama piisava veeauru difusiooni külmas ja niiskes kliimas. Kuid arvestades, et käesolevas töös ei ole tegemist usaldusväärse arvutusmudeliga, võib täpsema mudeli korral osutuda ilma tuulutuseta aurutõkkega ristlõige toimivaks lahenduseks. Mudeli tulemustes on põhjust kahelda materjalide suure ebamäärasuse pärast. Materjalide omadused tuleks määrata mõõtmiste kaudu kuna arvutusmudelid toimisid ainult ilma kaldvihmata ning andmebaasis ei leidu piisavalt täpseid lahendusi niiskustehnilise toimivuse adekvaatseks hindamiseks. Arvutustulemused kümme korda vähendatud veeimavusega (A_w = 0.0093 -> A_w = 0.00093) krohviga näitavad, et hallituse tekke ohtu ei ole. Hallitusindeksit mõjutab ka materjali ja materjali pinna tundlikkuse õige hindamine hallituse suhtes. Antud töös määrati puitkiudisolatsiooniplaadi pind hallituse suhtes tundlikuks, kuid lähedasemad uuringud võivad grupeerida toote keskmise vastupidavusega materjaliks.

Mõõtetulemused ei kajastanud imiteeritud vihmalekke märgatavat mõju mõõdetavatele suurustele (suhteline õhuniiskus ja temperatuur), võrdväärse vihmalekke kogusega läbi viidud arvutus näitas sama. (Kukk et al., 2019) uurimustöö vihmalekke mõjust ETICS-iga kaetud MHM („Massiv-Holz-Mauer") paneelist välisseina niiskustehnilisele toimivusele sai samalaadsed tulemused, kui kivivillaga kaetud MHM paneeli pinnal aurutõkke kõrval ei tekitanud 1%-line vihmaleke märgatavat muutust suhtelise õhuniiskuse väärtusele. Ühe protsendiline vihmaleke CLT paneeli ja soojustuse vahel kajastub tarindi hallitusindeksi arvutamisel, kuid ei oma märgatavat mõju välispiirde niiskustehnilisele toimivusele. Hallitusindeksi väärtus tõusis kõige enam 3.13%. (Künzel & Zirkelbach, n.d.) tehtud uurimustöös ETICS-iga, kus kasutati soojustusena EPS-i, jõuti järeldusele, et 1%-lise vihmalekke esinemisel soojustuse taha on niiskuse kuivamine väliskeskkonda marginaalne ning seetõttu tõstab see sisekihi niiskuskahjustuse ohtu. Kuna käesoleva töö tulemused soojustuse taga nähtavat vihmalekke mõju ei täheldanud, võib järeldada, et puitkiudplaat on niiskuse välja kuivamise võimaldamise seisukohalt parem soojustusmaterjal. Arvestades, et tavalise hoone korral ei tõuse rõhuerinevus üle 50 Pa, siis (Ullet & Brown, 1996) kohaselt oleks

horisontaalse vigastusega krohvis ETICS-i vihmalekke hulk hinnanguliselt 0.2%. Seda arvestades ei ohusta vihmaleke antud ristlõike niiskustehnilist toimivust.

Antud uurimustööst lähtuvalt oleks toimivate tuleviku uurimuste läbi viimiseks vaja välja töötada arvutusmudel, kus on kasutatud puitkiudplaati ID 693, mis järgis erinevate mõõtetulemuste trende üsna täpselt, ning katta see väiksema veeimavusega krohviga. Selleks tuleks Delphini andmebaasi luua uus tänapäevasem krohv või korrektselt muuta mõne juba olemasoleva materjali omadusi, et see vastaks tegeliku toote käitumisele ja toimiks realistlikult. Vajadusel tuleb vähendada ka soojustusplaadi veeimavust, kui ainult krohvi omadused liigse veeimavuse olukorda lõplikult ei paranda. Lisaks tuleks sisuka ülevaate saamiseks viia edasised uurimused läbi vähemalt aasta pikkuse mõõteperioodiga, et see sisaldaks aasta ringset välikliima kõikumist.

7. JÄRELDUSED

Antud lõputöös uuriti puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirde soojus- ja niiskustehnilist toimivust kasutades selleks valideeritud arvutusmudeleid. Töö tulemuste põhjal võib teha järgmised järeldused:

- Mõõtetulemuste põhjal koostatud arvutusmudelid, kasutades ainult arvutustarkvara Delphin 6.1.5 andmebaasis olevaid materjale, andsid mõõtetulemustele ligilähedasi tulemusi vaid temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse kasutamisel ääretingimustena. Kaldvihma lisamine väliskeskkonna ääretingimuseks ei võimaldanud mudeleid piisava täpsusega valideerida.

- Lõpliku ja rahuldava hinnangu andmiseks tuleks soojus- ja niiskuslevi arvutustarkvaras Delphin'i andmebaasi täiendada uute nii puitkiudsoojus-isolatsiooni materjali kui ka krohvi materjali failidega, et see vastaks antud uuringus kasutatud materjalide omadustele.

- Tuleviku uurimistöö võiks antud uuringus kasutatud materjalide omadused määrata nii laboratoorsetel mõõtmistel kui ka kirjanduse ülevaate põhjal. Selle kaudu on võimalik luua uued, tänapäeval projekteeritud hoonetel kasutatavate materjalide (ETICS-ites kasutatavad krohvid ja soojusisolatsiooni materjalid) failid, mille kaudu arvutusmudelite valideerimine lõpuni viia.

- Arvutustarkvara andmebaaside materjalidega koostatud arvutusmudelite järgi ei ole uuritud välispiirete soojus- ja niiskustehniline toimivus tagatud. Arvutatud hallitusindeks viie aasta perioodil näitab kasvutrendi ja akumuleerunud niiskus ei kuiva tarindist lõplikult välja ning hallituse tekkimise oht CLT paneeli pinnal on suur.

- Arvutusmudelites kasutatud krohvi veeimavuse koefitsendi, Aw, kümne korra vähendamine (A_w = 0.0093 -> A_w = 0.00093), mis tänapäevaste ETICS lahenduse krohvidel on määratud, ei näidanud hallituse tekkimise riski 5 aasta perioodi jooksul.

- Kuniks pole tõestatud vastupidiselt valideeritud arvutusmudelitega, massiivpuidust välispiirde katmisel puitkiudsoojusisolatsiooni materjaliga tuleks kaaluda tuulutuse tagamist fassaadil, mis tagab piisava väljakuivamise võimekuse.

- Arvutustulemustes kuni ühe protsendiline vihmaleke CLT paneeli ja soojustuse vahelises kihis ei omanud märgatavat mõju uuritud välispiirete soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele.

- Arvutustarkvara andmebaaside materjalidega koostatud arvutumudelite tulemused näitasid märgatavat mõju aurutõkke kasutamisel, mis vähendas hallituse tekke riski välisseinas. Tuleviku uuringud võiksid aurutõkke kasutamise positiivset mõju kinnitada ja selle ulatuse suuruse täpselt määrata valideeritud arvutusmudelitega.

8. KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

2021 International Building Code (IBC). (n.d.). Retrieved April 13, 2023, from https://codes.iccsafe.org/content/IBC2021P2

Alsayegh, G. (2012). *Hygrothermal Properties o f Cross Laminated Timber and Moisture Response o f Wood at High Relative Humidity*.

Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017a). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, *114*, 307–332. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.12.033

Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017b). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, *114*, 307–332. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.12.033

Brandner, R. (2013). *(PDF) Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report*. https://www.researchgate.net/publication/261884030_Production_and_Technology_of_Cross_Laminated_Timber_CLT_A_state-of-the-art_Report

Brandner, R., Flatscher, • G, Ringhofer, • A, Schickhofer, • G, & Thiel, • A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, *74*, 331–351. https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5

Bunkholt, N. S., Rüther, P., Gullbrekken, L., & Geving, S. (2021). Effect of forced convection on the hygrothermal performance of a wood frame wall with wood fibre insulation. *Building and Environment*, *195*, 107748. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107748

Byttebier, M. (2018). *Hygrothermal Performance Analysis of Cross-Laminated Timber (CLT) in Western Europe.*

DELPHIN. (n.d.). Retrieved April 9, 2023, from https://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php

EN 16351:2021. (2021). *Timber structures - Cross laminated timber - Requirements*.

European Association for ETICS (EAE). (2021). *ETICS with rendering system*. Brochure. https://www.ea-etics.com/etics/about-etics/

EVS-EN 13183-1:2002. (2002). *Saematerjali üksuse niiskussisaldus. Osa 1:Määramine kuivatusmeetodil*. https://www.evs.ee/et/evs-en-13183-1-2002

EVS-EN ISO 10456:2008. (2008). *Ehitusmaterjalid ja tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtuste määramise meetodid.*

EVS-EN ISO 12572:2016. (2016). *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method*. https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-12572-2016

EVS-EN ISO 15148:2003. (2003). *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion*.

Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., Almeida, J., Flores-Colen, I., Vieira de Castro, N., & Duarte, L. (2021). Onsite monitoring of ETICS comparing different exposure conditions and insulation materials. *Journal of Building Engineering*, *42*, 103067. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103067

Hagentoft, C.-E. (2001). *Introduction to Building Physics*. Studentlitteratur AB. https://bsesc.energy.gov/sources/introduction-building-physics

Horvathova, M. (2021). Facade Insulation from Wood-Fiber Boards in The Burning Process. *Transportation Research Procedia*, *55*, 1415–1422. https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2021.07.127

Hygrothermischer Materialmodellierung Unter Berücksichtigung Der Hysterese Der Feuchtespeicherung, V., & Gregor Albrecht Scheffler, D.-I. (1978). *VALIDATION OF HYGROTHERMAL MATERIAL MODELLING UNDER CONSIDERATION OF THE HYSTERESIS OF MOISTURE STORAGE*.

Ilomets, S., Kalamees, T., & Vinha, J. (2018). Indoor hygrothermal loads for the deterministic and stochastic design of the building envelope for dwellings in cold climates. *Journal of Building Physics*, *41*(6), 547–577. https://doi.org/10.1177/1744259117718442/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1744259117718442-FIG14.JPEG

Kahangi Shahreza, S., Niklewski, J., & Molnár, M. (2022). Novel water penetration criterion for clay brick masonry claddings. *Construction and Building Materials*, *353*, 129109. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129109

Kalamees, T., & Vinha, J. (2004). Estonian Climate Analysis for Selecting Moisture Reference Years for Hygrothermal Calculations. *Http://Dx.Doi.Org/10.1177/1097196304038839*, *27*(3), 199–220. https://doi.org/10.1177/1097196304038839

Knauf. (2015). *Knauf SM700 Pro*. Brochure. https://www.knauf.de/profi/sortiment/produkte/sm700-pro.html#showtab-tab_1474_4

Kukk, V., Kalamees, T., & Kers, J. (2022). *Hygrothermal Criteria for Design of Cross-Laminated Timber External Walls with Ventilated Facades*.

Kukk, V., Kers, J., & Kalamees, T. (2019). *Hygrothermal Performance of Mass Timber Wall Assembly with External Insulation Finish System*. www.ashrae.org

Kukk, V., Kers, J., Kalamees, T., Wang, L., & Ge, H. (2022). Impact of built-in moisture on the design of hygrothermally safe cross-laminated timber external walls: A stochastic approach. *Building and Environment*, *226*, 109736. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109736

Künzel, H. M., & Zirkelbach, D. (n.d.). *Influence of rain water leakage on the hygrothermal performance of exterior insulation systems*.

Li, H., Wang, B. J., Wei, P., & Wang, L. (2019). Cross-laminated Timber (CLT) in China: A State-of-the-Art. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, *4*(1), 22–30. https://doi.org/10.21967/JBB.V4I1.190

Mass Timber - American Wood Council. (n.d.). Retrieved April 13, 2023, from https://awc.org/issues/mass-timber-2/

Mass Timber Construction | Laminated Timber | Think Wood. (n.d.). Retrieved April 13, 2023, from https://www.thinkwood.com/mass-timber

Meynen, J. (2016). *Cross Laminated Timber (CLT) Bouwdelen Met Bouwvocht En Gewijzigde Luchtdichtheid.*

Pro Clima. (2023). *SOLITEX ADHERO 1000*. https://proclima.com/products/external-sealing/solitex-adhero-1000/technical-specs#sub_navigation

STEICO. (2022). *STEICOprotect dry*. Brochure. https://www.steico.com/en/products/etics/steico-etics-timber/steicoprotect-dry

TenWolde, A., McNatt, J. D., & Krahn, L. (1988). *Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings*. https://doi.org/10.2172/6059532

Ullet, J. M., & Brown, W. C. (1996). *Measured Pressure Equalized Performance of an Exterior Insulation Finish System (EIFS) Specimen*.

V. Kukk. (2022). *Hygrothermal Criteria for Design of Cross-Laminated Timber External Walls with Ventilated Facades*.

Van De Kuilen, J. W. G., Ceccotti, A., Xia, Z., & He, M. (2011). Very Tall Wooden Buildings with Cross Laminated Timber. *Procedia Engineering*, *14*, 1621–1628. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.07.204

Van Linden, S., & Van Den Bossche, N. (2022). Review of rainwater infiltration rates in wall assemblies. *Building and Environment*, *219*, 109213. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109213

Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., & Zirkelbach, D. (2015). Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models. *Energy Procedia*, *78*, 1425–1430. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.11.165

Viitanen, H., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Vinha, J., Lähdesmäki, K., Salminen, K., & Viitanen, S. (n.d.). *Mould Growth Modelling to Evaluate Durability of Materials*.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A., & Käkelä, P. (2005). *Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona*. https://trepo.tuni.fi/handle/10024/128233

Wu, Y. (2007). *Experimental study of hygrothermal properties for building materials*.

Zilling, W. (2009). *Moisture Transport in Wood Using a Multiscale Approach.*