



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

**PUITKIUDSOOJUSISOLATSIOONI
LIITSÜSTEEMIGA KAETUD
MASSIIVPUIDUST VÄLISPIIRETE
SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILINE TOIMIVUS**

**HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF MASS TIMBER
EXTERNAL WALL COVERED WITH WOOD FIBER
THERMAL INSULATION COMPOSITE SYSTEM**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Reio Pihlak

Üliõpilaskood 182269

Juhendaja: Villu Kukk, Teadur

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: Reio Pihlak

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2023

Juhendaja: Villu Kukk

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2023.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Reio Pihlak (sünnikuupäev: 01.12.1998)

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

Puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehniline toimivus, 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)

TalTech Instituudi nimetus

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Reio Pihlak, 182269 EAEI

Õppekava, peeriala: EAEI – Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine

Juhendaja: Villu Kukk, teadur, 6202402

Lõputöö teema:

Puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehniline toimivus

Hygrothermal performance of mass timber external wall covered with wood fiber thermal insulation composite system

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud CLT paneeli soojus- ja niiskustehniline toimivus välispiirdena
2. Uurida puitkiudvilla toimivust võimaliku niiskuslekke korral
3. Võrrelda võimaliku lekke põhjustatud mõju väliskliimast tingitud muutustega.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	CLT testhoone mõõtesüsteemida paigaldus.	01.12.2022
2.	Kirjanduse ülevaade.	19.01.2023
3.	Metoodika andmete analüüsiks ja hindamiseks.	01.03.2023
4.	Mõõteperioodi lõpp	14.11.2023
5.	Andmete analüüs ja hindamine.	19.11.2023

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 22.12.2023.a

Üliõpilane: Reio Pihlak ".....".....2023.a
/allkiri/

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

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö on järg (Saare, 2023) kirjutatud tööle, mis uuris vihmalekke mõju puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirde soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele.

Töö eesmärgiks oli mõõtetulemuste abil hinnata uuritud välispiirde toimivust ning niiskusrežiimi, mille käigus viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli CLT testmajas mõõtmised. Mõõtmiste käigus kogutud andmeid analüüsiti hindamiseks ristlõike soojus- ja niiskustehnilist käitumist ning vihmalekke mõju selle toimivusele.

Käesolevas töös uuritud välisseinas kasutati soojustusena puitkiudplaati Steico Protect Dry. Testmaja katsesein oli jaotatud viieks seinalõiguks, millest kaks olid kaetud puidu ja soojustuse vahelise ilmastikukaitse kangaga ning ülejäänud ilma kangata. Töös analüüsiti aastase mõõteperioodi jooksul tunniajase intervalliga fikseeritud temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse väärtuseid algusega oktoober 2022 – oktoober 2023. Lisaks mõõdeti puitpaneelis ka niiskussisaldusi ning välispiirde üldist soojusvoogu.

Mõõteperioodi jooksul imiteeriti neljas seinalõigus erinevates tarindi vahekihtides ka vihmaleket, et hinnata selle mõju mõõdetavatele väärtustele, kusjuures viies sein jäi referentsseinaks. Välisseina niiskustehnilise toimivuse kriteeriumiks määrati hallituse teke. Hallitusrisiki hinnati esialgselt registreeritud suhteliste õhuniiskuste põhjal, misjärel kriitiliste õhuniiskuste saavutamise korral anti täpsem hinnang hallitusele tuginedes (Viitanen et al., 2011) hallitusmudelile, mille alusel Exceli andmetöötlusega töö käigus arvutati ka vastavad hallitusindeksid.

Mõõtetulemuste põhjal mudeliga teostatud arvutused näitasid, et puitkiudsoojusisolatsioonil põhineva ETICS-iga kaetud massiivpuidust välissein on niiskustehniliselt küllaltki toimiv lahendus, kuna CLT paneeli ja soojustuse vahel hallitusrisiki ei tuvastatud. Hallitusrisk esines küll krohvi ja soojustuse vahelises kihis, kuid kuna antud tulemused saavutati küllaltki kriitiliste materjaliväärtustega, mis suure tõenäosusega ei vasta tõele, on hallitusrisiki puhul pigem tegemist spekulatsiooniga.

Imiteeritud veelekked väga väikese mõju tõttu ei suudetud õhutõkke- ja ilmastikukaitsekangast tingitud erinevusi puidu niiskussisaldustes märgata. Samuti vedas selles osas alt ka puidu niiskussisalduste hindamise meetodika.

Kuna selles uurimistöös jäi sein süstitud veelekked konkreetne asukoht küllaltki umbmääraseks tuleks sein toimivuse täpsemaks hindamiseks koostada konkreetseid arvutusmudelid, mis suudaksid arvestada veelekked mõjuga ka väljaspool mõõtepunkte. Samuti peaksid tulevased uuringud näiteks laborikatsete abil välja selgitama uuritavas konstruktsioonis kasutatud materjalide täpsed niiskustehnilised omadused, mille abil oleks võimalik ka lõplik hinnang toimivuse osas anda.

SUMMARY

This thesis is a follow-up to the work written (Saare, 2023), which investigated the effect of rain leakage on the thermal and moisture technical performance of a solid wood exterior wall covered with a composite system of wood fiber thermal insulation.

The aim of the work was to use the measurement results to evaluate the performance of the investigated external boundary and the humidity regime, during which the measurements were carried out in the CLT test house of the Tallinn University of Technology. The data collected during the measurements were analyzed to evaluate the thermal and moisture technical behavior of the cross-section and the effect of rain leakage on its performance.

In the external wall studied in this work, the wood fiber board Steico Protect Dry was used as insulation. The test wall of the test house was divided into five wall sections, two of which were covered with a weather protection fabric between the wood and the insulation, and the rest without fabric. The work analyzed the fixed temperature and relative humidity values at hourly intervals during the annual measurement period starting from October 2022 - October 2023. In addition, the moisture content in the wooden panel and the general heat flow of the outer boundary were also measured.

During the measurement period, rain leakage was also simulated in the four wall sections in different interlayers of the foundation in order to evaluate its effect on the measured values, while the fifth wall remained the reference wall. Mold formation was determined as the criterion for the moisture technical performance of the outer wall. The risk of mold was initially assessed based on the recorded relative humidity, after which, if critical humidity was reached, a more accurate assessment was given based on the mold (Viitanen et al., 2011) mold model, on the basis of which the corresponding mold indices were also calculated during work with Excel data processing.

Based on the measurement results, the calculations performed with the model showed that the solid wood exterior wall covered with ETICS based on wood fiber thermal insulation is a quite functional solution in terms of humidity, as no risk of mold was detected between the CLT panel and the insulation. The risk of mold did occur in the layer between the plaster and the insulation, but since the given results were achieved with rather critical material values, which are most likely not true, the risk of mold is rather a matter of speculation.

Due to the very small effect of the simulated water leakage, the differences in the moisture content of the wood due to the air barrier and weather protection fabric could not be observed. The methodology for assessing moisture content in wood also failed in this regard.

Since in this research the specific location of the water leakage injected into the wall remained rather vague, for a more accurate assessment of the performance of the wall, specific calculation models should be prepared that would be able to take into account the effect of water leakage outside the measurement points as well. Also, future research should, for example, find out the exact moisture technical properties of the materials used in the structure being studied, with the help of laboratory tests, which would also allow for a final assessment of performance.

SISUKORD

TalTech Instituudi nimetus	4
EESSÕNA	10
Lühendid	11
Tähised	12
1. SISSEJUHATUS.....	15
1.1 Töö sisu, eesmärgid ja probleemid	15
1.2 Ristkihtliimpuit	17
1.2.1 Inimtegevuse mõju keskkonnale	17
1.2.2 Puidust ehitamine on keskkonda säästev	17
1.2.3 Mis on Ristkihtliimpuit?	19
1.3 Ristkihtliimpuidu füüsilised omadused	20
1.3.1 Niiskuslikud omadused	20
1.3.2 Soojustehnilised omadused	22
1.3.3 Ristkihtpuitpaneeli omaduste määramine	24
1.4 Ristkihtliimpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehniline toimivus	26
1.5 ETICS ehk soojusisolatsiooni liitsüsteem	28
1.5.1 Puitkiudvillast soojusisolatsioonimaterjal	30
1.5.2 Soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud välispiirete soojus- ja niiskustehniline toimivus	30
1.5.3 ETICS süsteemiga kaasnevad probleemid	31
2 METOODIKA	34
2.1 Katsemetoodika	34
2.1.1 Testmaja ehitus	35
2.1.2 Katseseinad	38
2.1.3 Uuritava välispiirde ehitusfüüsiliste omaduste määramine	45
2.1.4 Mõõtevahendid	47
2.1.5 Kohapealsed soojusvoo mõõtmised	50
2.1.6 Soojustuse veemavus, lekke imiteerimine	52
2.1.7 Väliskliima	53
2.1.8 Sisekliima	54
2.2 Arvutusmetoodika	55
2.2.1 Kaldvihma arvutamine	55
2.2.2 Hindamiskriteeriumid	56
3 TULEMUSED	60
3.1 Testseintes suhteliste õhuniiskuste ja temperatuuride mõõtetulemused	60

3.2 Testseintes suhteliste õhuniiskuste ja temperatuuride kevadised mõõtetulemused	66
3.3 Testseintes suhteliste õhuniiskuste ja temperatuuride sügisesed mõõtetulemused	69
3.4 Kevadised ja sügisesed suhtelised õhuniiskused ja temperatuurid lõikudel 44 ja 45 ees- ja tagapool ilmastikukaitsekanga kihti	75
3.5 Testseinte hallitusindeksid	79
3.6 Puidu mõõdetud niiskussisaldused	85
3.7 Testseinte soojusläbivused	89
4 DISKUSSIOON.....	97
5 JÄRELDUSED	102
6 KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	104

EESSÕNA

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

Antud magistritöö keskendub soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud ristkihtliimpuidust paneeli kui välispiirde soojus- ja niiskustehnilise toimivuse hindamisele. Seejuures hinnatakse katsete abil vihmalekke mõju tarindi eri kihtides. Töö peamiseks eesmärgiks oli hinnata mõõtetulemuste abil uuritud välispiirde toimivust ning niiskusrežiimi. Selleks teostati Tallinna Tehnikaülikooli CLT testmajas mõõtmised, misjärel tabeltöötlusprogrammi Excel abiga kogutud andmeid analüüsiti. Töös on välja toodud erinevad katsetulemused ning nende võrdlus ka arvutustulemustega.

Võtmesõnad: CLT, ETICS, vihmalekke, magistritöö

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

RH (ing. keeles relative humidity) – suhteline õhuniiskus

Tähised

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

ρ_d - kuiv tihedus [kg/m³]

a_0 - konstant

a_1 - konstant

M - niiskussisaldus (protsent kuivmassist) [%]

k_0 - konstant

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]

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]

IS - 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 [$^{\circ}$]

θ – seina orientatsioon põhjasuuna suhtes [$^{\circ}$]

IWS – seina vihmalekke indeks (wall spell index) [l/m^2]

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

CR – maastikutüübi indeks (roughness coefficient) [-]

CT – topograafia indeks (topography coefficient) [-]

O – takistuse tegur (obstruction factor) [-]

W – seina tegur (wall factor) [-]

p_v – veeauru osarõhk [Pa]

p_a – õhu osarõhk [Pa]

μ – veeauru difusioonitakistustegur [-]

θ_{por} – materjali poorsus [m^3 /m^3]

p_v – veeauru osarõhk [Pa]

p_a – õhu osarõhk [Pa]

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

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 [%] sd – suhteline difusioonitakistus [m]

A_w – veeimavuse tegur [-]

1. SISSEJUHATUS

1.1 Töö sisu, eesmärgid ja probleemid

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on uurida puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehnilist toimivust ning seejuures hinnata ka kaldvihmast põhjustatud vihmalekke mõju seinale. Selle lõputöö läbivaks teemaks on puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteem kui tuulutamata seinalahendus, mis on niiskustehnilisest seisukohast oluliselt riskantsem variant kui tuulutatavad konstruktsioonitüübid. Meie põhjamaistes kliimatingimustes peab soojusisolatsiooni liitsüsteemi viimistluskihina kasutatav krohv taluma küllaltki suuri välisteguritest tulenevaid koormusi, milleks on talviti madalad miinuskraadid ja pidev jäätumise-sulamise protsess, samas suvel kohati üpris kõrged plusskraadid ning intensiivne UV-kiirgus. Lisaks sellele peab sein pidevalt vastu pidama kaldvihmale, mis eelnevalt mainitud kliimafaktorite abil kipub ka läbi krohvikihi pragude seina sisse imendumas kui krohvi eluiga on ületatud või kahjustatud. Lisaks tuleb toimiva seina projekteerimisel arvestada olukorda, kus lisaks meie kliimale omasest talvisest toimivuse põhimõttest, mil toimub veeauru difusioon seest välja, tuleb suvel teatud perioodidel arvestada ka vastupidist olukorda, kus difusioon toimub suunaga väljast sisse. Teema on seda aktuaalsem seetõttu, kuna kliimasoojenemisest ei räägita enam mitte ainult kui kaugest tuleviku probleemist, vaid see juba annab endast märku mõjutades meie igapäeva elu.

Seina märgumise ja väljakuivamise protsessi uurimiseks korraldati katsemajas välismõõtmised, kus imiteeriti kaldvihmast põhjustatud niiskusleket tarindisse ning uuriti selle mõju seina soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele. Käesolev uurimistöö on jätk (Saare, 2023) uurimistööle, mille käigus hinnatakse mõõtetulemuste põhjal soojusisolatsiooni liitsüsteemiga massiivpuidust välispiirde toimivust pikema perioodi jooksul.

Tööle seati järgmised eesmärgid:

- Uurida, kuidas puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiire toimib soojus- ja niiskustehniliselt olukorras, mil kaldvihm satub tarindisse.
- Kuidas toimib antud lahendus suvistes tingimustes, mil veeaurudifusiooni suund on talvise perioodiga võrreldes vastupidine

- Hinnata õhutõkke- ja ilmastikukaitsekanga mõju ristkihtliimpuidust konstruktsioonis ning kas see omab märgilist tähtsust eeldades, et see kaitseb ristkihtliimpuitu märgumise eest kaldvihmast tingitud lekke korral.
- Kui suurt tähtsust omab puitkiudvillast soojustuse hallituse tundlikkus piirde niiskustehnilise toimivuse hindamiseks?
- Määrata puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirde soojusläbivus arvutuslikult ja mõõdetud soojusvoogude kaudu.

Uurimistöö teema valik tuleneb massiivpuidust välispiirete toimivust hinnanud uuringute vähesusest, seda just eriti tuulutamata seinalahenduse puhul ning puitkiud soojusisolatsiooni materjali korral.

1.2 Ristkihtliimpuit

1.2.1 Inimtegevuse mõju keskkonnale

21. sajandi kolmandaks kümnendiks oleme jõudnud punktini, kus üleilmseks läbivaks probleemiks on inimtegevusest tulenevad keskkonnas toimuvad negatiivsed muutused ja nendest tingitud probleemid. Seetõttu on maailmas järjest tähtsamal kohal roheline mõtteviis ja sellega seonduvad tavad ja normid, mida tahetakse kaasata kõikidesse võimalikesse valdkondadesse. Teatavasti on ehitussektor maailmas suurimat mõju avaldav valdkond ning seega töötavad ka ehitusinsenerid selle nimel, et tulevaste elu- ja töökeskkondade rajamisega anda ka omaltpoolt panus roheliikumisse.

Euroopa Liit on väljastanud ehitussektorile energiatõhususe direktiivi (*Energiapoliitika: Üldpõhimõtted*, 2015), mille eesmärgiks on 2030. aastaks vähendada sektori kasvuhoonegaaside heidet ja energiatarbimist ning 2050. aastaks saavutada kliimanetraalsus. Sellest lähtudes on ka Eesti Vabariigi Valitsus on loonud aastaks 2030 strateegia (2007), mille üheks eesmärgiks on seatud see, et Eestis valitseb valdavalt keskkonnasõbralik tarbimismudel, kus keskkonnakorralduse vahendid on rakendatud selle nimel, et inimesed mõistaksid, et kasulik on käituda looduse suhtes hästi. On ka rõhutatud, et insenerid ja tehnoloogid kui ka muudel erialadel tegutsejad arvestaksid oma ettevõtmistes keskkonnamõju juba toote, projekti või protsessi kavandamise faasis.

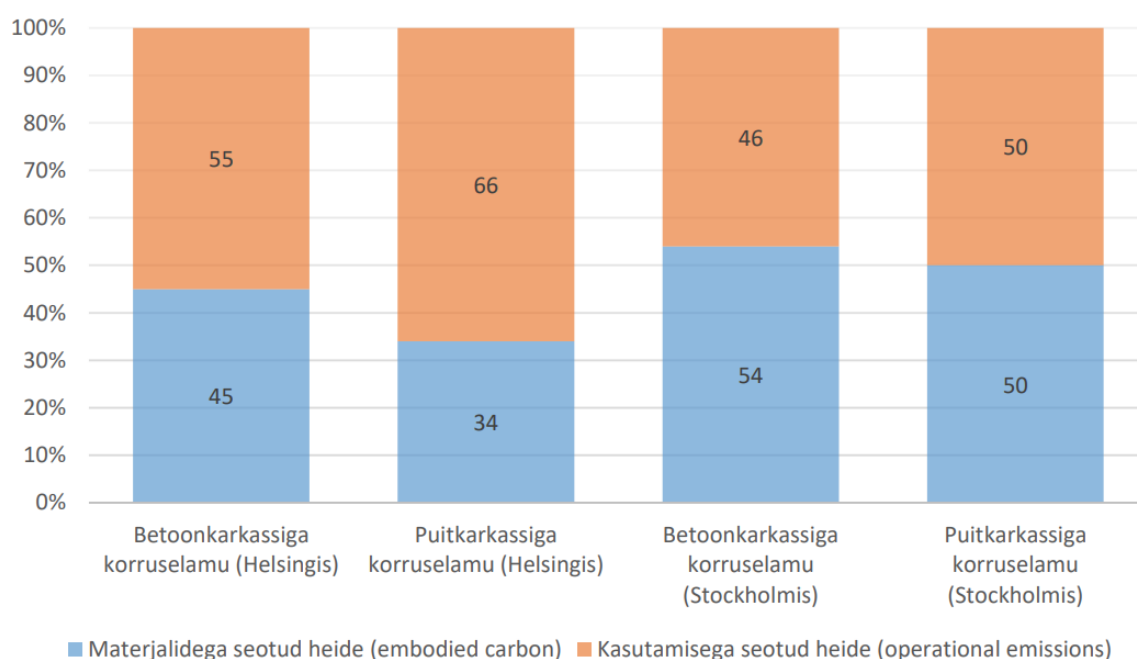
1.2.2 Puidust ehitamine on keskkonda säästev

Puidupõhine ehitus on jätkusuutlik valik, sest see on looduslikult taastuv ehitusmaterjal. Globaalsetest elutsükli uuringutest on selgunud, et puitehitised tekitavad vähem kasvuhoonegaase, õhu- ja veereostust, jäätmeid ning kasutavad ka tunduvalt vähem loodusressursse kui teised enamlevinud hoonetüübid. Lisaks keskkonnasõbralikkusele pakuvad loodust säästvad projektid rohkem huvi ka arendajatele kui ka lõpptarbijatele. Hodes Weill & Associates (2022) läbiviidud küsitluse kohaselt on tänapäevaste regulatsioonide tõttu ka investoritel suurem huvi just keskkonnasõbralike projektide vastu.

1 kuupmeeter puitu salvestab endas metsas kasvamise jooksul atmosfäärist 1 tonni süsinikdioksiidi, andes seejuures suure panuse kliimakaitseks. Näiteks Austrias, mis on Euroopa mõistes pindalalt pigem väiksem riik, on aastane puidu juurdekasv 31 000 000 tihumeetrit. Seda numbrit arvestades saaks tuua võrdluseks, et iga 40 sekundi jooksul

kasvab juurde suurusjärg puitu, millest piisaks ligikaudu ühepere elamu ehitamiseks. (Jörg, 2010)

Terve maailma toodetavast energiast tarbivad hooned ligi 30% ning põhjustavad 40% kogu tekitatud süsiniku emissioonidest (Tatra, 2023) Hoone elukaare jooksul tekkivad heited jaotatakse kahte gruppi. Esimesse gruppi kuuluvad energiatarbest põhjustatud heited ning teise gruppi ehitusmaterjalidest tulenevad heited, ehk siis heited, mis pärinevad tooraine hankimisest, tööstusest, transpordist jne. (Tatra, 2023) on toonud välja, Joonis 1, et puitkarkassiga hoonel jääb materjalidega seotud heide enam kui 10% väiksemaks kui betoonkarkassiga hoonel.

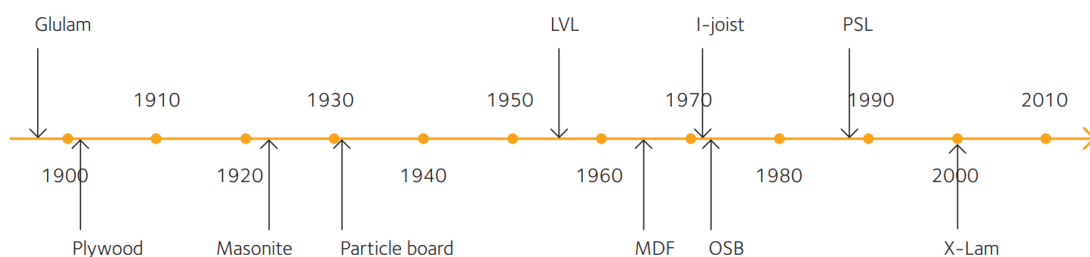


Joonis 1. Süsinikeite osakaalud erinevate korruselamute puhul. (Tatra, 2023)

Betoon kui levinud ehitusmaterjal on aastakümneid võimaldanud kujundada linnu kiirelt ja efektiivselt, tänu millele on tänaseks päevaks kujunenud keskkonnad, mida mõnesaja aasta eest ei oleks suutnud veel keegi ette kujutada. Tänapäeva puidutehnoloogia võimsa arengu tõttu on sellist mastaapi juba püüdnud ka puidupõhine ehitus. (Franco, 2019) 21. sajandi maailmas on tähtsal kohal roheline mõtteviis ja sellega seonduvad tavad ja normid. Olenemata valdkonnast ja teemast on aktuaalsel kohal jätkusuutlikkus ja keskkonna säästmise.

1.2.3 Mis on Ristkihtliimpuit?

19.sajandil sai alguse puidutehnoloogia valdkonnas suur areng, mil töödeldi välja palju uusi kasutusviise puitmaterjali efektiivsemaks kasutamiseks. See areng oli suuresti tingitud kõrge väärtusega puidu nappusest, mille tõttu pidi leidma rakendust ka madalama kvaliteediga puidule. (Godonou, 2022) Puidutehnoloogia ning puitmaterjalide arengut on illustreeritud Joonis 2.



Joonis 2. Ligikaudne erinevate puitmaterjalide väljatöötamiste ajatelg (Godonou, 2022)

Ristkihtliimpuit, inglise keelse lühendina CLT (Cross Laminated Timber), tuntud ka nimetuste all BSP, X-lam, on lamineeritud täispuidust toode kasutamiseks nii kandvas kui ka mittekanavas ehituskonstruktsioonis. Ristkihtliimpuit koosneb minimaalselt kolmest omavahel risti paigutatud ning liimitud lamellide kihist, vaata Joonis 3 (EVS-EN 16351, 2015)



Joonis 3. Ristkihtliimuidu ristlõige

Ristkihtliimpuitu on nimetatud „tuleviku betooniks“ kuna ta täidab samaväärselt betoonile kohaseid häid omadusi. Omavahel risti paigutatud lamellid annavad paneelile võimekuse täielikult kasutada ära puidu head omadused, ehk hea tõmbetugevuse

puiduki piki suunas ning hea survetugevuse vastupidises suunas. (Li et al., 2019) Ristkihtliimpuit on erinevalt betooni haprast olekust küllaltki elastne materjal. Ristkihtliimpuit talub erinevalt betoonist enne purunemist küllaltki suuri deformatsioone ning on väga kerge materjal keskmise kaaluga vaid 0,4 t/m³ kui betoon kaalub 2,7 t/m³. (Franco, 2019)

EVS-EN 16351 (2015) kohaselt peavad paneelides kasutatavad lamellid olema tugevussorteeritud EN 14081-1 järgselt ning kasutatud puidu kasutamine ei ole lubatud. Paneeli kihtides olevad lamellid peavad kuuluma samasse tugevusklassi.

Peamiselt kasutatakse CLT tootmisel okaspuu puitu, enamasti harilikku kuuske, *Picea abies*. (Brandner, 2013) EVS-EN 16351 (2015) ütleb ka, et lõplikud kihtide paksused peaksid olema minimaalselt 6mm, kuid mitte rohkem kui 45mm. Seda välja arvatud juhul kui ei ole tegemist kolme kihilise paneeliga, mille korral on sisemise kihi paksuseks lubatud kuni 60mm. CLT paneeli kogupaksus ei tohiks ületada 500mm.

Projekteerides CLT konstruktsiooni valmistatakse kõik detailid ja elemendid tehases valmis niimoodi, et objektile enam muudatusi ei tehta ning toimub vaid montaaž. CLT tootmise tolerantsid jäävad võrreldavasse klassi mööbliga, elementide täpsus jääb 2mm piiridesse. (Franco, 2019)

1.3 Ristkihtliimpuidu füüsikalised omadused

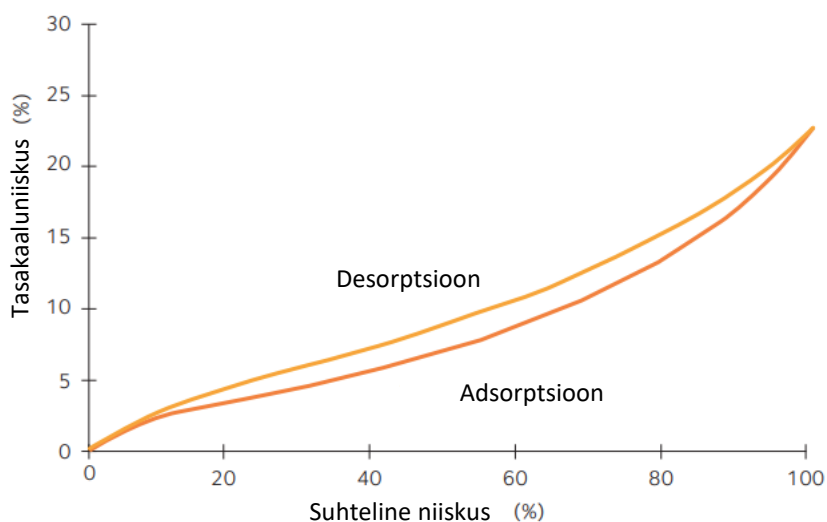
1.3.1 Niiskuslikud omadused

Ristkihtliimpuit käitub hügrokoopsete omaduste poolest küllaltki sarnaselt tavalisele puitmaterjalile. Puidu omadused sõltuvad suuresti seda ümbritsevast keskkonnast. Olenevalt keskkonna õhuniiskusest toimuvad puidus protsessid nagu adsorptsioon ja desorptsioon. Adsorptsioon puidus on teatud tüüpi füüsiline nähtus, mis tähendab, et moodustuvad vesiniksidemed rakuseinte OH-rühmade ja õhus olevate veemolekulide vahel.

Kui ümbritseva keskkonna suhteline õhuniiskus tõuseb, tõuseb ka puidu niiskussisaldus ehk toimub adsorptsioon, mille tõttu hakkavad puidurakuseinad vett imama. Vastupidiselt kui keskkonna suhteline õhuniiskus langeb toimub desorptsioon, ehk puidu rakuseinad loovutavad veemolekule. (Wang et al., 2013)

Hetk, millal rakuseinad on veega küllastunud kuid veel vaba vesi rakkude õõnsustest puudub nimetatakse rakuseina küllastuspunktiks. Puidu rakuseina küllastuspunkt on murdepunktiks paljudele puitmaterjali omadustele. Näiteks puidus toimuvad mahumuutused leiavad aset tänu rakuseinas niiskuse muutustele. Raku õõnsuses toimuvad muutused mahukahnemisi ei põhjusta. Euroopas kasvavate okaspuude rakuseinte küllastuspunkt varieerub enamasti 27% kuni 33% vahel. (Godonou, 2022)

Peamine tegur, mis puidu omadustele mõju avaldab on niiskussisaldus. Niiskussisalduse tase, mille korral vee adsorptsioon ja desorptsioon on tasakaalus, nimetatakse tasakaalu niiskussisalduseks. Kui puidu niiskussisaldus on tasakaaluniiskusest väiksem seob puit endaga õhus olevaid veemolekule ning toimub adsorptsioon ning kui niiskussisaldus on tasakaaluniiskusest suurem toimub desorptsioon, ehk puit eraldab endas sisalduvat niiskust ümbritsevasse keskkonda. (Godonou, 2022) Õhu suhtelise niiskuse ja puidu tasakaalu niiskussisalduse omavahelist suhet kirjeldab Joonis 4.



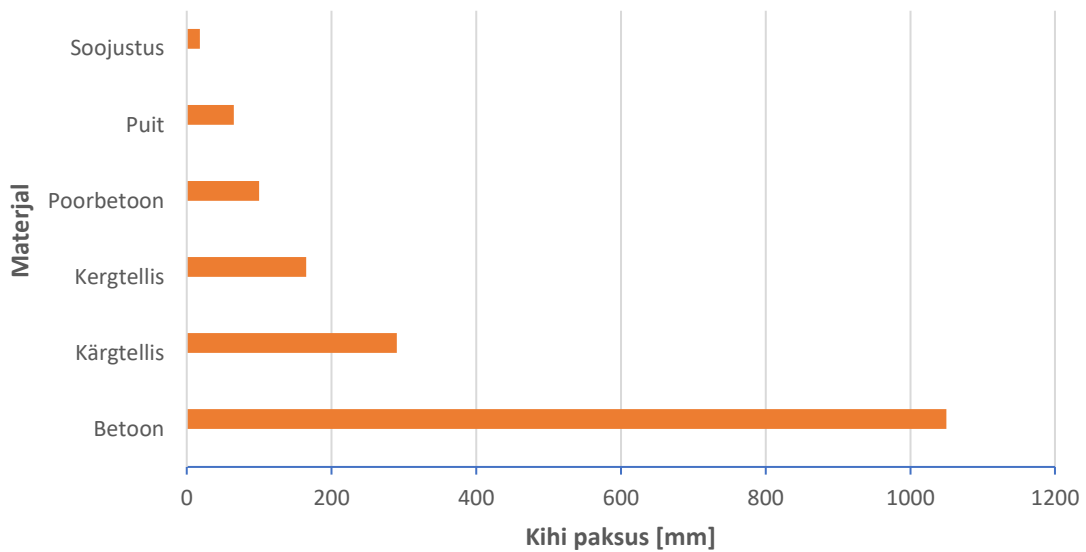
Joonis 4. Puidu tasakaaluniiskus olenevalt keskkonna suhtelisest õhuniiskusest. (Godonou, 2022)

Byttebier ja AISayegh on mõõtnud veeauru difusiooni ristkihtliimpuidus ning mõlemad jõudsid järeldusele, et niiskemas keskkonnas leiab aset üleüldine difusioonitakistuse langus. Leiti, et alates ligikaudu 60% suhtelisest õhuniiskusest takistus langeb. Samuti tulemused näitasid ka seda, et niiskuslevi puidus oleneb suuresti ka puidukiu asetusest. Puidupaneeli piki kiudu mõõdeti niiskuslevi kordades suuremaks kui niiskuslevi risti paneeli. (Byttebier, 2017; AISayegh, 2012)

Seetõttu on eelnevat silmas pidades puitmaterjali kasutamisel ehitusplatsil väga oluline pöörata tähelepanu töödegraafikutele ja paneelide platsil ladustamise tingimustele. Materjali korrektseks ladustamiseks on esmatähtis tunda ümbritseva keskkonna mõju ning niiskuslevi ristkihtliimpuidust paneelides. Kahjuks on igapäevases ehitustegevuses pidevalt kuulda, kuidas massiivpuidust ehitatud hoonetel esinevad praod, pinged ja muud probleemid kohtades, kus neid ei tohiks olla. Enamjaolt ongi taolised probleemid tingitud ehitusjärgus materjali väärkäsitlemisest ja sellest tulenevast ehitusaegsest liigniiskusest. Näite saab tuua isegi TalTech linnaku Mäepealse 3 ehitusmaja näol, kus ehitusaegse puidu niiskuse tõttu hiljem palju pragunemisi deformatsioone massiivpuidus tekkis.

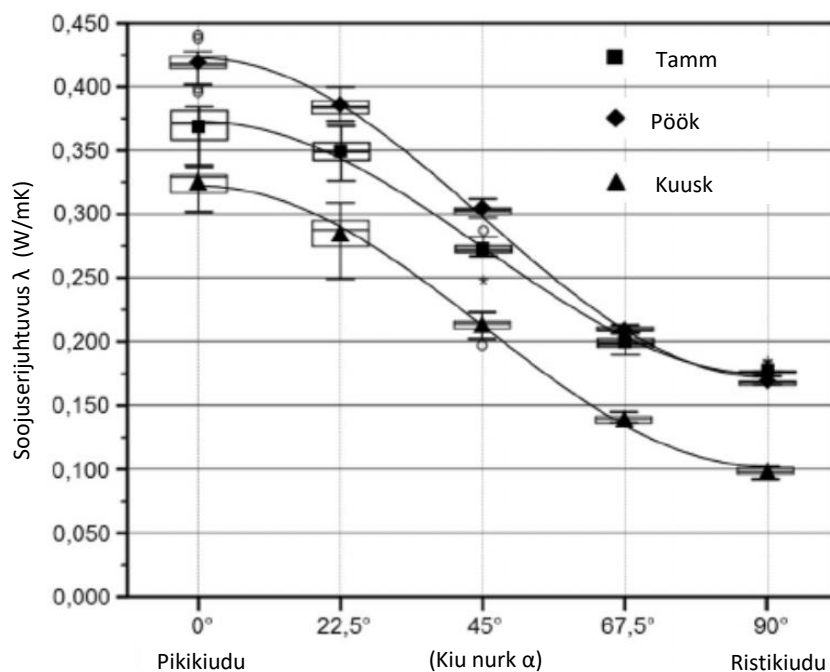
1.3.2 Soojustehnilised omadused

Soojusjuhtivus λ [W/(mK)] on materjali omadus, mis näitab kui suur hulk soojust läbib ühel ruutmeetril ühe meetri paksusest antud materjalist tarindit ühe kraadise pinnatemperatuuride erinevuse korral. Erinevaid materjale iseloomustamiseks sobib hästi Joonis 5, kus on toodud paksused millimeetrites, et saavutada soojustakistus väärtusega 0,5 [m²K/W]. Joonis 5. Erinevad materjalid ja nende vajalikud kihtide pakused, et tagada soojustakistus väärtusega 0,5 [m²K/W] (Teibinger & Matzinger, 2013) illustreerib puidu häid soojuslikke omadusi, mis loob sellele teiste levinud ehitusmaterjalide ees tugeva eelise. Seega erinevalt klassikalistest konstruktsioonimaterjalidest nagu betoon ja müürikivi on puitkonstruktsioon tunduvalt halvem soojusjuht mille tõttu ka efektiivsem energiatõhususe poolest ning lisaks aitab vähendada ka konstruktsiooni mõõtmeid.



Joonis 5. Erinevad materjalid ja nende vajalikud kihtide pakused, et tagada soojustakistus väärtusega 0,5 [m²K/W] (Teibinger & Matzinger, 2013)

Kuna puit võib olla kohati väga anisotroopne materjal on tema omadused tihti suure varieeruvusega. Nagu Joonis 6 kujutab on puidu soojuseri juhtivus piki kiudu kordades suurem kui risti kiudu. Kuuse puidu puhul on (Vay et al., 2015) mõõtund kuuse piki kiudu soojusjuhtivuseks ligikaudu 0.325 (W/mK) ning risti kiudu 0.1 (W/mK).



Joonis 6. Puidu soojuseri juhtivus olenevalt kiu asetusest. (Vay et al., 2015)

Soojuseri juhtivus puidus oleneb suuresti ka puidu niiskuse sisaldusest ja konkreetse materjali tihedusest, mida kirjeldab järgnev lineaarne seos (Asdrubali et al., 2017) :

$$\lambda = d(a_0 + a_1 M) + k_0$$

,kus

λ – on materjali soojuseri juhtivuse tegur [W/(m*K)]

d – on kuiva materjali tiheduse väärtus [kg/m³]

$a_0 ; a_1 ; k_0$ – on konstandid

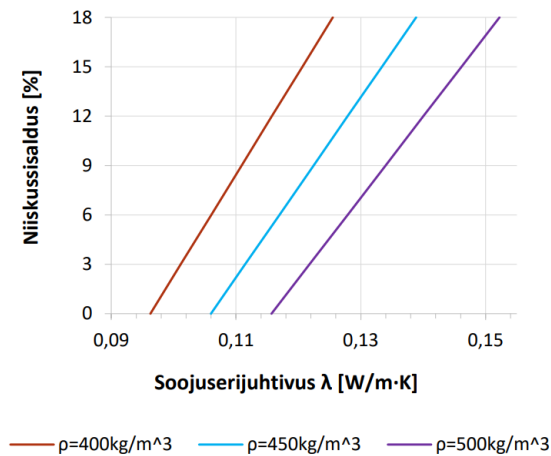
M – on kuiva materjali niiskussisaldus [%]

Lisaks (Vay et al., 2015) on puidu soojusjuhtivust uurinud ka AlSayegh (2012) ja Byttebier (2017) ning mõlemad on saanud sarnaseid tulemusi. Mõlemad on olenevalt puidu liigist ning niiskussisaldusest mõõtnud keskmisteks väärtuseks ruumi suhtelise õhuniiskuse 50% ning temperatuuril 20°C ligikaudu 0.11 W/(m*K). Mõõdetud tulemused näitasid ka soojuseri juhtivuse ja niiskuse vahelist lineaarset sõltuvust.

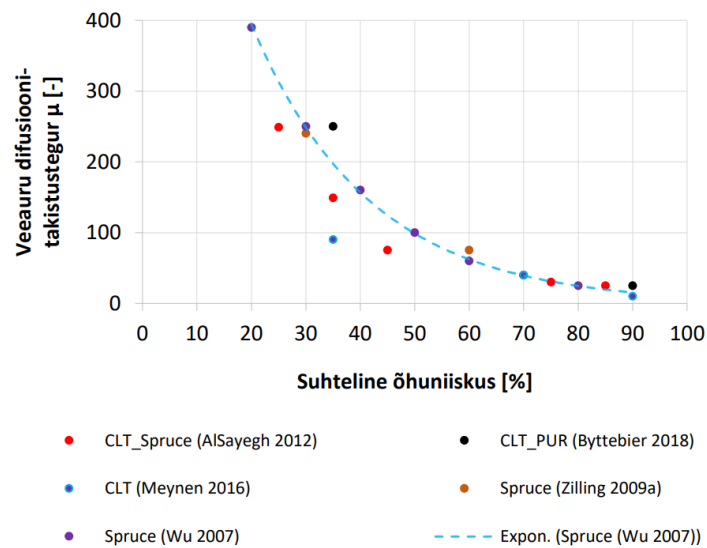
1.3.3 Ristkihtliimpuitpaneeli omaduste määramine

Kuna ristkihtliimpuidust paneeli omadused sõltuvad paljuski ümbritsevast keskkonnast ja materjali niiskussisaldusest hinnati paneeli omadusi ka kooli laboris. Samuti kuna puit on kohati väga anisotroopne materjal on omadused tihti suure varieeruvusega. Näiteks on puidu soojusjuhtivus piki kiudu kaks korda suurem kui risti kiudu ning sõltub materjali niiskussisaldusest ja tihedusest. (Asdrubali et al., 2017) Et määrata ristkihtliimpuitpaneeli omadusi saeti ehitusjärgus ühest paneelist välja katsekeha. Leidmaks paneeli niiskussisaldus mõõdeti ja kaaluti katsekeha ning seejärel kuivatati kuivatuskapis. Saematerjali niiskussisalduse leidmise meetodit kirjeldab standard (EVS-EN 13183-1, 2002) Leitud niiskussisalduse abil oli võimalik määrata materjali tihedus, tiheduse abil määrati ka paneeli soojuseri juhtivus. Ristkihtliimpuidust paneeli määratud omadused Tabel 1.

Ristkihtliimpuidu veeauru difusioonitakistust on mõõtnud Byttebier (2017) ja AlSayegh (2012) ning mõlemad on järeldanud, et veeauru takistus on pöördvõrdeline suhtelise niiskusega ja niiskemas keskkonnas leiab puidus aset üldine difusioonitakistuse langus ning hakkab domineerima vee juhtivus mitte auru vaid kapillaarse kondensatsiooni kujul.



Joonis 7. Soojuseri juhtivuse sõltuvus niiskussisaldusest puidu ristikiu suhtes. (Saare, 2023)



Joonis 8. Puidu veeauru difusioonitakistusteguri sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest. (Saare, 2023; Byttebier, 2018; Alsayegh, 2012; Meynen, 2016; Wu, 2007, Zilling, 2009)

1.4 Ristkihtliimpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehnlise toimivus

Ehitusmaterjali valikul on alati esmatähtis tunda materjali ning selle käitumist eksploatatsiooni jooksul esineda võivates tingimustes. Põhiprintsiip, mida kvaliteetse tarindi saavutamiseks tuleks järgida on, et ehitised tuleb projekteerida neid ümbritseva keskkonna järgi arvestades kõiki füüsikaseadusi. (Lstiburek, 1999)

Laial konsensusel on arusaam, et hoone tarindis toimuv veeauru liikumine tuleb hoida võimalikult limiteeritud, et vältida niiskusest tulenevaid probleeme. Hügrokoopsetes kapillaarsetes ehitusmaterjalides toimub niiskuslevi kombineeritud veeauru ja vee vedela oleku kaudu ning on mõjutatud keskkonna temperatuuri ja niiskuse gradientidest. Standardi (EVS-EN ISO 15148:2003) järgi on niiskuslevi jagatud kolme faasi:

- Madala õhuniiskuse juures toimub niiskuslevi puhtalt difusiooni teel
- Kõrgema õhuniiskustaseme korral, kuni 95%, toimub korraga nii veeauru difusioon kui ka pooride kaudu vee vedelal kujul levik
- Üle 95% õhuniiskuse korral toimub vee liikumine vedelal kujul läbi pooride, mida mõjutab juba kapillaarrõhk. Ehk siis olukord, kus materjal on vette kastetud või näiteks materjalile sajab kaldvihm.

Põhjamaises kliimas toimub enamuse aastast suurema ruumisise niiskuslisa ja veeauru osarõhkude tõttu pea alati veeauru difusioon toast õue. See tähendab, et difusiooni tõkestamiseks tuleb paigaldada aurutõke tarindi sisepinda, et vältida veeauru kondenseerumist seina välimistes kihtides. Põhiline faktor, mis seina vajaliku aurutakistuse teguri määrab on ruumi sisene niiskuslisa. Niiskuslisa suurus sõltub peamiselt kahest tegurist – hoone ventilatsioonist ning elanike arvust ja nende aktiivsusest tingitud niiskustoodangust. Enamik seinalahendusi toimivad olukorras, kus niiskuslisa on madal. Vead hakkavad esile kerkima siis kui niiskuslisa suureneb tulenevalt ruumi kasutajate tegevusest või muudest võimalikest teguritest. Tarind aga tuleb lahendada nii, et niiskusprobleeme ei tekiks olenemata hoone kasutajate täpsest arvust ning veetarbe harjumustest.

Toimiva lahenduse loomine on tänasel päeval seda kriitilisem, et ehituskvaliteet on paranenud. Vanadel majadel on võrreldes tänapäevaste ehitistega tunduvalt õhema

soojustuskihiga seinad ning need on ka kordades vähem õhupidavamad, mis aitab kondenseerumise riski madalamal hoida. Vanal majal on tarindi väliskihi temperatuur oluliselt kõrgem ning seetõttu ka soojustusmaterjalis pooriõhu suhteline õhuniiskus madalam. Märgilist vahet omab vanematel majadel ka ahju kütmine, mis tekitab tупpa alarõhu ning seda pidi konvektisoon on ka soodne talvisel perioodil seinaniiskustehniliseks toimimiseks.

Lihtsamad põhimõtted, mis tagavad seinatöökindluse põhjamaises kliimas, kus veeauru difusioon on sisekliimast väliskliimasse, on tarindi sisemises kihis paiknev piisava aurutakistusega aurutõke ning madala soojusjuhtivusega tuuletõke, mis oleks samal ajal võimalikult madala aurutakistusega. (Vinha, 2007)

Varasemalt on ristkihtliimpuidust paneelide niiskuslikku toimivust hinnanud McClung (McClung et al., 2014), kes imiteeris ehitusaegset liigniiskust seinapaneelides, ning seejärel hindas niiskuse välja kuivamist. Uuringu käigus ehitati 3 erinevat välise tuulutusvahega seinatüüpi, :

- Kõrge veeauru läbilaskvusega sein, mis koosnes auru läbilaskvast aurutõkke kihist ning mineraalvillast soojustusest.
- Keskmise veeauru läbilaskvusega sein, mis koosnes auru läbilaskvast aurutõkke kihist ning EPS soojustusest.
- Madala veeauru läbilaskvusega sein, mis koosnes auru mitte läbilaskvast aurutõkke kihist ning mineraalvillast soojustusest.

Paneelide niiskustehnilist toimivust hinnati Wangi (Wang et al., 2013) poolt läbiviidud uuringu põhjal, mis hindas, et puidu lagunemisprotsessi alguseks on vajalik 26% niiskussisaldust 20 kraadi juures ning seda vähemalt 6 kuud.

Kuigi (McClung et al., 2014) läbiviidud uuringu käigus saavutati paneelide märgamise käigus niiskussisaldus isegi üle 30% kuivasid kõik seinad välja juba esimese kuu jooksul piisavalt, et niiskussisaldus jäi alla 26%. Kuigi ka madala veeauru läbilaskvusega sein kuivas piisavalt kiiresti, et välistada puidu lagunemist ning hallituse teket, oli sellel siiski risk võimalikuks kahju tekkeks juhul kui oleks esinenud mõni pikaajsem niiskusleke. See probleem juhib tähelepanu olukorrale, et mis toimuks juhul kui ristkihtliimpuidust tuulutamata seinalahenduses peaks esinema mõni pikaajalisem niiskusleke, milleks käesolevas töös on leke kaldvihmast.

Ristkihtliimpuidust seinä niiskustehnilist toimivust on hinnanud ka (Kukk et al., 2022). Ka tema poolt uuritud seinatüübid olid tuulutatud fassaadiga. Testseiad olid soojustatud mineraalvillaga, tselluvillaga ning PIR-isolatsioonimaterjaliga. Katsetatud testseiad olid erilised selle poolest, et neil puudus aurutõke, mis on meie kliimas kujunenud tavaliseks ehituspraktikaks. Seinad ehitati valmis nii tehasekuivadest ristkihtliimpuidust paneelidest, mille niiskussisaldus oli 13% kui ka märgadest paneelidest, mille pinnaniiskused ulatusid kuni 26%-ni. Seinä toimivust hinnati hallituse kasvu ja veeauru kondenseerumise järgi. Hallituse kasvu kriitiliseks piiriks arvestati olukorda, kus puitpaneeli ja soojustuse vahel tõuseks suhteline õhuniiskus üle 80% ning soojustuse ja tuuletõkke vahel kuni 100%.

Suhteline õhuniiskus CLT ja soojustuse vahel jäi kõigis seintes vahemikku 20 kuni 75%. Testseintes, mis koosnesid märgadest paneelidest ületas küll suhteline õhuniiskus väljakuivamise alguses CLT ja soojustuse vahel 80%, kuid kuna see periood jäi piisavalt lühikeseks ei kujutanud see ohtu hallituse tekkeks CLT pinnal. Tähelepanu püüdis tselluvillaga soojustatud katsesein, mis paistis silma madalamate suhteliste õhuniiskustega väljakuivamise perioodil kui teised seinad. See kinnitas tselluvillale iseloomulikke niinimetatud 'puhveromadusi', mis aitab hoida seinä niiskusrežiimi stabiilsema kui seda suudab näiteks mineraalvill.

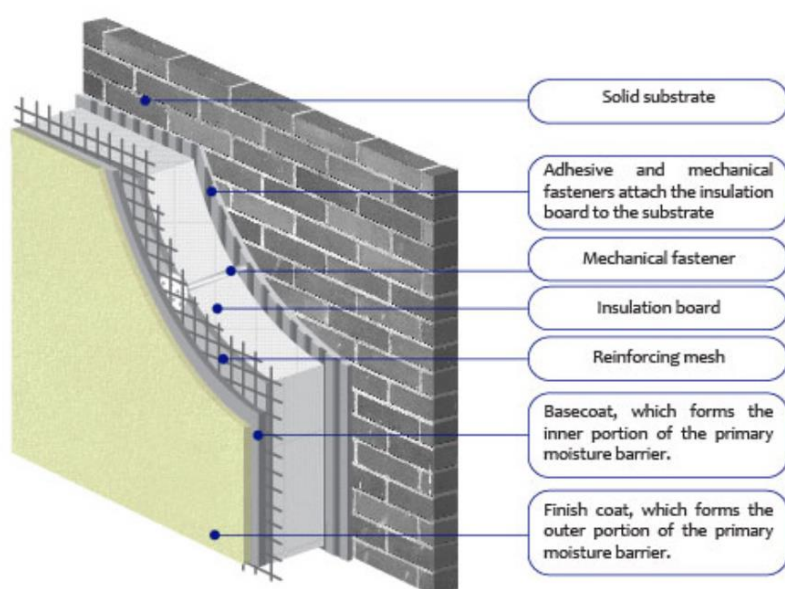
Seega hoolimata sellest, et seintel puudus eraldi aurutõkke kiht toimisid kõik testseiad nii, et hallituse risk oli välistatud. See kinnitab ristkihtliimpuidu võimekust kontrollida veeauru difusiooni välispiirdes ja puudub vajadus eraldi veeaurutõkke paigalduseks.

Ristkihtliimpuidust konstruktsioone on peamiselt uuritud vaid tuulduva fassaadiga ning enamasti on keskendutud vaid CLT niiskussisalduse lubatud piiri määramisele. Uuringute jooksul on selgunud, et isegi juhul kui peaks toimuma mingil põhjusel paneeli märgumine siis hallituse tekkeks ohtu ikkagi ei ole. Seetõttu on ka selle töö probleemi püstitus tähtis, et uurida kuidas käitub ristkihtpuitpaneel tuulutamata fassaadilahenduse korral ning kuidas toimib niiskusrežiim juhul kui peaks esinema pidev niiskuslekke allikas, antud töös siis veeleke kaldvihmast.

1.5 ETICS ehk soojusisolatsiooni liitsüsteem

ETICS on inglise keelne lühend sõnadest External Thermal Insulation Composite System, mis tähendab eesti keelses tõlkes soojusisolatsiooni liitsüsteemi. Vaata Joonis

9. ETICS süsteem sai alguse 20.sajandi keskpaiga Euroopast, mil anti esimene patent vahtpolüstüreenplaadile ning töötati välja ka esimene sünteetiline krohv. Kuna hoonefond vajas süsteemi, mis oleks suuteline isoleerima vanemaid müüritisi ning ühtlasi parandama ka fassaadide ilmet leidis laialdast kasutust just ETICS süsteem, mis tänu kiirele paigaldusele ja kuluefektiivsusele oma koha turul ka kindlustas. ETICS süsteemi moodustavad soojustusplaat, mis kantakse konstruktsioonile kas liimaine või mehaaniliste kinnititega ning krohvisüsteemist, mis kantakse otse soojustusele. ETICS süsteemi illustreerib Joonis 9. Euroopa Soojusisolatsiooni Liitsüsteemi Assotsiatsioon (EAE, 2023) on öelnud, et kui juba varasemalt paigaldatud ETICS süsteemi eluiga on vaja pikendada või kui on soov hoone energiatõhusust veel enamgi parandada on heaks praktikaks paigaldada olemasoleva süsteemi peale veel teinegi ETICS kiht.



Joonis 9. ETICS süsteemi kirjeldus. 1)alussein; 2)liimaine ja mehaanilised kinnitid soojustuskihi paigaldamiseks; 3)mehaanilised isolatsiooniplaadi kinnitid; 4) soojustus; 5) krohvi armeering; 6,7)krohv (Terraco Group, 2023)

Kuigi valdavalt on ETICS süsteemi puhul soojustusena kasutusel kas polüstüreenist või mineraalvillast isolatsioonimaterjalid, siis selles uurimuses kasutati soojustusena puitkiudvillaplaate Steico Protect. Puitkiudvillast soojustusmaterjalil on head hügrokoopseid omadused, mis võrreldes klassikaliselt kasutatava mineraalvillaga on suurema niiskumahtuvusega ning seetõttu aitab hoida niiskulisast tuleneva difusiooni põhjustatud niiskust seinas stabiilsena ja vältida hallituse riski (Kukk et al., 2021). Hügrokoopne soojustusmaterjal tagab tarindile „puhveromaduse“, mis pidurdab sügisperioodil konstruktsiooni märgumist kuid samas ka väljakuivamist kevadel. Seega hügrokoopne soojustus justkui võiks aidata kaasa tarindi töökindlusele olukorras, kus

tarindi aurutakistus on madal või esineb väline niiskusallikas. Taoliste „puhveromadustega“ soojustusmaterjalide toimivust on hinnanud headele tulemustele varasemalt (Kukk et al., 2022), mis mõjutas ka selles uurimustöös soojustsmaterjali valikut.

1.5.1 Puitkiudvillast soojusisolatsioonimaterjal

Kuigi uued taaskasutatavtest materjalidest toodetud isolatsioonimaterjalid on omandanud hea maine oma loodussõbralikkuse ja väiksema süsiniku jalajälje tõttu, on nende kasutamine küllaltki piiratud, sest nende materjalide omadused ei ole veel piisvalt määratletud ning tööpiirid niiskustehnilise toimivuse ja kahjustuste tekkimise osas on veel hägused.

Puitkiudvill on üks kaasaegsetest soojusisolatsioonimaterjalidest, mida taastuvast toorainest, ehk kõiksugustest puidutööstuse kõrvalproduktidest toodetakse. Hoolimata sellest, et puitkiust isolatsioonimaterjali soojusjuhtivuslikud omadused jäävad mõningal määral alla teistele klassikalistele isolatsioonimaterjalidele on selle suureks plussiks keemiliste naftaühendite sisaldus, mis on võrreldes teiste toodetega küllaltki madal. Enamjaolt sisaldab puitkiud vill keemilistest ühenditest vaid polüamiidi, mis aitab kiudu omavahel paremini siduda ning ammooniumfosfaati ja parafiini, mis tagavad materjalile tule- ja niiskuskindluse. (Wood Fibre Insulation, 2021)

Puitkiust isolatsioonimaterjali omadusi uurinud (Tanaka et al., 2021) leidis, et isolatsioonimaterjalid näitasid kõrge niiskustaseme korral tugevat vastupanu mädaniku tekkele, mille põhjal järeldati isegi seda, et antud materjalide toimivuse hindamisel võiks neid käsitleda isegi vastupidavamana kui tavalist männipuitu. Mis antud uurimuse korral vajab erilist tähelepanu on aga fakt, et uuritud materjalid sisaldasid kõik hüdrofoobset lisandit, mis omab tugevat mõju plaadi niiskuskindlusele. Seega materjalid, kust lisandid puuduvad võivad olla hallituse suhtes ka kordades tundlikumad kui (Tanaka et al., 2021) uuringus käsitletud isolatsioonimaterjalid, mistõttu on praktikas esmatähtis pöörata eraldi tähelepanu igale tootele näiteks laboritestide korraldamisega.

1.5.2 Soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud välispiirete soojus- ja niiskustehniline toimivus

ETICS süsteemi paigaldamine on lihtne ja efektiivne viis, kuidas muuta hooneid energiatõhusamaks ja parandada nende ilmet ning seetõttu on ETICS populaarne hoonete soojustuslahendus. Puitkarkassil majad on üldiselt ehitatud tagant tuulutatud laudise või tellismüüritisega. Kui tarind on lahendatud tuulutusvahelga ning laudise või

müüritisega on sein kaitstud otsese kaldvihma eest ning seinal on võimalus välja kuivada. Sein niiskussisaldust mõjutab vaid väliskliima suhteline õhuniiskus.

Soojustusmaterjalina kasutatakse enamasti mineraal- või kivivilla, mis on kaetud veeauru läbilaskva tuuletõkkega. Niiskusprobleemide vältimiseks paigaldatakse soojustusest sisekeskkonna poole ka aurutõke, et hoida ära võimalikku niiskuskoormust soojustuses, mis võib põhjustada veeauru kondenseerumise ning seejärel hallituse tekke. Kuna ETICS süsteemil on otsene kokkupuude väliskeskkonnaga, mis on soodne olukord niiskuslekke tekkimiseks on see võrreldes tuulutatava fassaadilahendusega niiskuslevi poolest küllaltki riskantne lahendus.

Enamasti kasutatakse ETICS lahendust vanematel kivimüüritistega majadel, mis vajavad renoveerimist. Taolistel juhtudel on ETICS süsteemi paigaldamine tõesti väga efektiivne lahendus, kuna kivimüüritis on niiskuse suhtes küllaltki vastupidav. Puitkonstruktsioonidel on aga ETICS lahendus oluliselt riskantsem, sest puit on niiskuskoormusele ja niiskuskahjustustele oluliselt tundlikum materjal kui seda on kivimüüritis. Küll aga on ETICS süsteemiga soojustamine viimasel ajal tõusev trend ka puitkarkassil hoonete ehituses. Lisaks tavapärasele veeauru difusioonile tuleb ETICS süsteemi puhul kindlasti arvestada ka võimaliku kapillaarse veeimavusega, mis on tingitud tekkivatest jõududest veemolekulide, materjali pooriseinte ning pindpinevuse fenomenist. (Hagentoft, 2001) Kapillaarne imavus on sein niiskustehnilisele toimivusele tihipeale suuremat kahju tekitav kui veeauru difusioon. Välistest ilmastikukoormustest tavapäraseks kapillaarse imavuse põhjustajaks on kaldvihm, mis tungib läbi kahjustada saanud ETICS krohvikihi ning imbub seeläbi tarindisse.

1.5.3 ETICS süsteemiga kaasnevad probleemid

Sulakatko on hinnanud ETICSI ehitusprotsessi ja on leidnud, et juba renoveeritud majadel esinevatest nähtavatest kahjustustest on enamus defekte põhjustatud ehitusaegsetest vigadest ning järeldati, et ETICS-i ehitusaegne protsess omab tugevat mõju edaspidisele süsteemi vastupidavusele ja kestvusele. Ehitusuuringute Instituudi 2011 uuringu kohaselt 66% ETICS soojustussüsteemiga hoonetest, mis ei vastanud soovitud energiatõhususe väärtustele, olid vead põhjustatud ehituse protsessi käigus tehtud vigadest. (Sulakatko, 2019)

Väga suurt rolli ETICS süsteemi toimivuses omab viimistluskihi vastupidavus. See õhuke kiht peab vastu pidama paljudele koormustele nagu vihm, tuul, temperatuuri muutus, UV kiirgus, lumi ja kõikidele võimalikele lenduvatele ühenditele. Kõik need tegurid avalduvad soojustussüsteemi viimistluskihil võimalike kahjustustena tekitades nii visuaalseid kui ka mehaanilisi defekte. Kahjustatud soojustusliitsüsteemile puitkonstruktsiooni kontekstis on tõenäoliselt ohtlikumaks väliseks teguriks kaldvihm.

Kahjustatud õhukese viimistluskihi kokkupuutel kaldvihmaga on väga tõenäoline niiskuslevi liitsüsteemi, mis soodustab puitkonstruktsiooni kahjustusi.

Toimiva ETICS lahenduse korral on võtmetähtsusega tegur armeerimismördi stabiilsus. Krohvisüsteemi vaheline adhesioon on tähtis, kuna kihid on väga tundlikud muutuvatele keskkonnatingimustele. Võimalikud kahjud näidatud Joonis 10.

(Liisma et al., 2015) testi tulemuste põhjal selgus, et armeerimisvõrgu kasutamine hoidis pea kõikidel juhtudel deformatsioonid ligikaudu 50% väiksemad. Raskendatud kliimaoludes aitab armeerimisvõrk krohvisüsteemis märgatavalt ära hoida deformatsioone, seega on väga tähtis, et võrgu installatsioonile pööratakse piisavalt tähelepanu.



Joonis 10. Armeerimismördi ja viimistluskihi delamineerumine kliimatsüklite korral. (Liisma et al., 2015)

Lisaks on (Liisma et al., 2014) hinnanud ka ETICS süsteemi paigalduse aegse väliskliima mõju süsteemile. Kuna põhja ja ida Euroopas on enamus aastast temperatuur ligi 0°C ning fassaade renoveeritakse aastaringselt ilma ilmastikukaitseta avatud tellingutel nagu illustreerib Joonis 11, on oht soojustuse paigalduseks mitte sobivatel tingimustel väga suur.



Joonis 11. ETICS süsteemi paigaldusprotsess avatud tellingutel

Uuringu käigus järeldati, et otsene vihm soojustusel või külmunud pind vähendab mördi ja soojustuse vahelist tugevust. Tugevamat mõju avaldab see väiksema tihedusega materjalil, mis imab rohkem vett ning seetõttu mördi kivistumise käigus aurustub rohkem vett, mis vähendab siduvust kihtide vahel. Seega on soojusisolatsiooni liitsüsteemi paigaldamisel väga tähtsal kohal ilmastikukaitse nii tööfrondil kui ka materjalide ladustamisel.

2 METOODIKA

2.1 Katsemetoodika

Uurimistöö läbiviimiseks korraldati kohapealsed mõõtmised Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse 3 ristkihtliimpuidust testmajas, Joonis 12. Uurimuse käigus registreeriti andmed nii testhoone sise- kui ka väliskliimast. Andurite abil mõõdeti testhoone põhjapoolse orientatsiooniga seina kihtide vahelisi suhtelise õhuniiskuse sisaldusi RH [%], temperatuure [°C], puidu niiskussisaldusi ristkihtliimpuidust paneelides [%], kui ka soojusvoogu seintes [$\frac{W}{m^2K}$]. Erinevates seinakihtides imiteeriti ka niiskusleket kaldvihmast, mille mõju kogutud andmete põhjal seina soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele hinnati. Mõõteperiood kestis vahemikus november 2022 – november 2023.



Joonis 12. Mäepealse 3 CLT testmaja.

2.1.1 Testmaja ehitus

Testmaja on 6,2 m pikk ja 2,8m lai, seinad on kõrgusega 3m. Testmajal on lamekatus, mis koosneb 100mm paksusest ristkihtliimpuit paneelist ja bituumenkattest.

Teshoone on rajatud 400mm paksusele XPS-plaatidest alusele, mis omakorda toetub killustikalusele. XPS plaadid seoti omavahel montaaživahuga.

Testmaja ehitati valmis tehases, kontrollitud sisetingimustes. Saavutamaks paneelide vahelist tihedust paigaldati montaaži käigus ristkihtliimpuidust elementide vahele ka tihendid, Joonis 13. Pärast elementide paika monteerimist fikseeriti need omavahel nurgikutega.



Joonis 13. Elemendi tihendatud servad ja elemente fikseerivad nurgikud.

Et vältida seinalõikude vahelist soojus- ja niiskuslevi ühtlustumist saeti seinalõikude vahele ka paari cm sügavused sooned, mis täideti Penosil elastse mastiksiga. Joonis 14. Kui elemendid olid fikseeritud paigaldati kahele seinalõigule viiest ka aurutõkke membraan. Lisaks freesitud soontele paigaldati seinalõikude vahele ka vahtpolüstüreeni tükid, Joonis 15, et takistada seinalõikude vahelist soojuse ja niiskuse levi. Tehases puuriti valmis ka kõik mõõteandurite jaoks vajalikud augud ning paigaldati temperatuuri- ja suhtelise õhuniiskuse andurid.



Joonis 14. Seinalõikude eraldamine freesitud soontega ning soone täitmine mastiksiga.



Joonis 15. EPS- ribadega eraldatud seinasektsioonid.

Tehases valmis ehitatud testmaja transporditi rekkaga kohale ning seejärel tõsteti autokraanaga paika, Joonis 16



Joonis 16. Testmaja paika tõstmine.

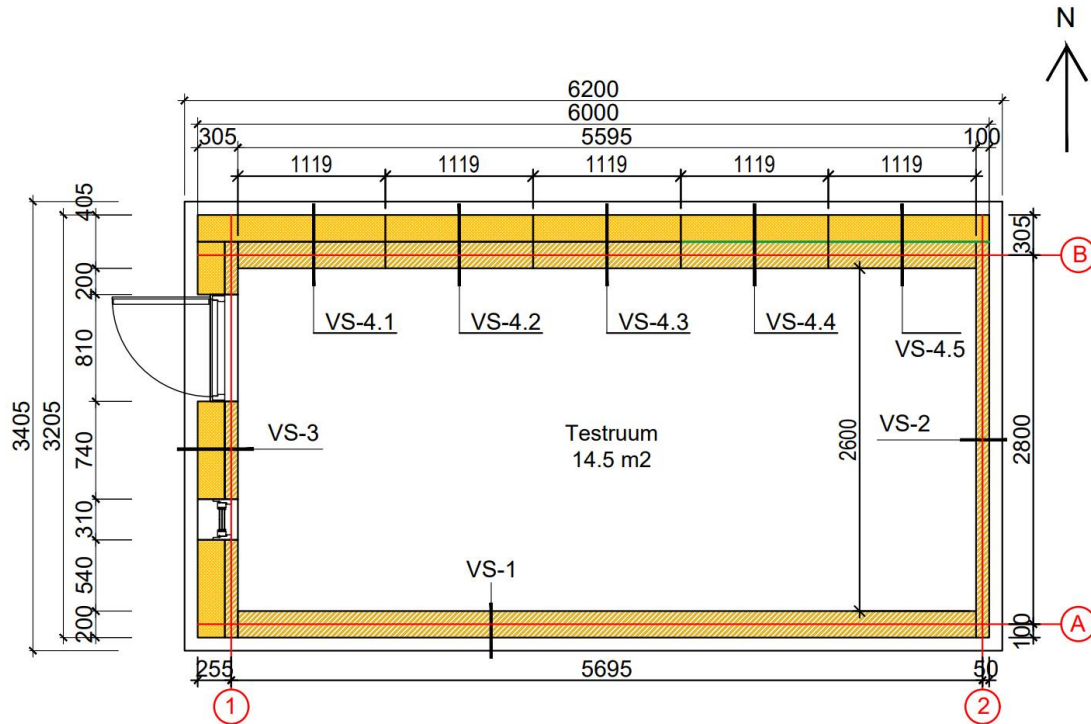
Lõplikult paigaldatud testmaja seinad oli välitingimustele avatud keskkonnas paigaldamise hetkest, Joonis 17, 20. septembrist, kuni krohvimistöödeni, mis teostati 24. oktoobril.



Joonis 17. Mäepealse 3 platsile paigaldatud CLT-testmaja enne krohvimistööd.

2.1.2 Katseseinad

Käesolevas töös uuritav sein on orientatsiooniga põhja, paksusega 405mm (200mm ristkihtliimpuitdust paneel + 200mm puitkiud vill + 5mm krohvikihit). Seina kogupikkus 5595mm. Testmaja plaanil toodud Joonis 18.



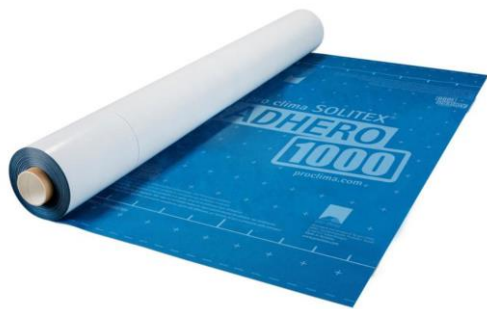
Joonis 18. Testmaja plaan.

Mõõtmiste teostamiseks oli testmaja sein jaotatud viieks seinalõiguks, VS4-1-VS4-5. Uuritud seinalõigud olid kõik välise puitkiudvillast liitsoojustussüsteemiga soojustatud. Uuritavad seinalõigud erinesid õhu- ja aurukile olemasolult ning ka imiteeritava veelekke askukoha poolest. Uuritud sein koosnes järgnevatest materjalidest:

Seina põhielemendiks valiti paneel tootjalt CLTEST, Joonis 19. Tegemist on 200mm paksu, viie kihilise paneeliga. Paneeli lamellid on toodetud kuuse puidust.



Joonis 19. CLTEST paneel. (Tooted – CLTest, 2023)



Joonis 20. Õhutõkke- ja ilmastikukaitse kangas Solitex Adhero.

Õhu- ja kaitsekangaks valiti avatud poorsusega ning difusiooni soodustav ilmastikukaitse kangas Solitex Adhero 1000, Joonis 20. Kangas on mõeldud kasutamiseks nii põrandates, seintes kui ka katustes. Tegemist on tootega, millel on täielikult liimitav pind.



Joonis 21. Steico Protect Dry.

Soojusisolatsioonimaterjaliks valiti toode Steico Protect Dry. Joonis 21. Tegemist on puitkiudvillast soojusisolatsiooniplaadiga, mis on oma suure niiskusmahtuvuse ning

auru läbilaskvate omadustega küllaltki hea „puhverkiht“ soodustades tarindi soojus- ja niiskustehnilisele toimivust keerulistes oludes.



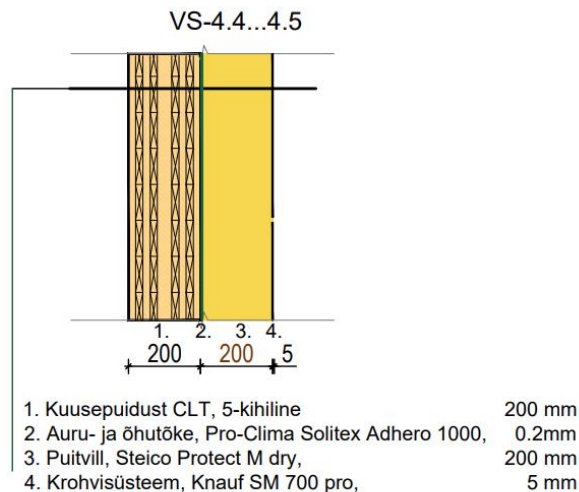
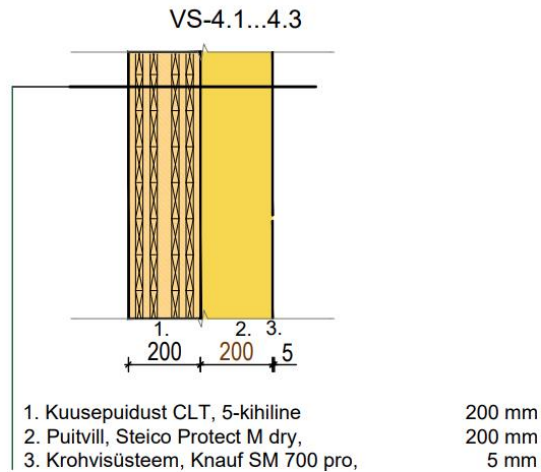
Joonis 22. Krohvisegu Knauf SM700 PRO ja krohvivõrk BRIKO.

Krohvisüsteemina kasutati universaalset mineraalipõhist krohvisegu Knauf SM700 PRO ning krohvimisvõrku BRIKO, Joonis 22.

Antud uurimistöö käigus uuritud seinalõikudes kasutatud materjalid ja nende tehnilised andmed on toodud Tabel 1. Ristlõiked testseinast kasutatud materjalidega on toodud Joonis 23.

Materjal	Kihi paksus	Soojuseri juhtivus λ	Tihedus ρ	Veeauru difusioonitakistustegur μ
	[mm]	[W/(m*K)]	[kg/m ³]	-
CLTEST ristkihtliimpuitpaneel	200	0.102	423	-
Solitex Adhero 1000	0.55	0.04	-	545
Steico Protect Dry	200	0.04	140	3
Knauf SM700 PRO	5	≤ 0.89	-	25

Tabel 1. Uuritavas seinakonstruktsioonis kasutatud materjalide tehnilised andmed. (STEICO, n.d.; Knauf, n.d.; Clima International, n.d.; CLTest, n.d.)

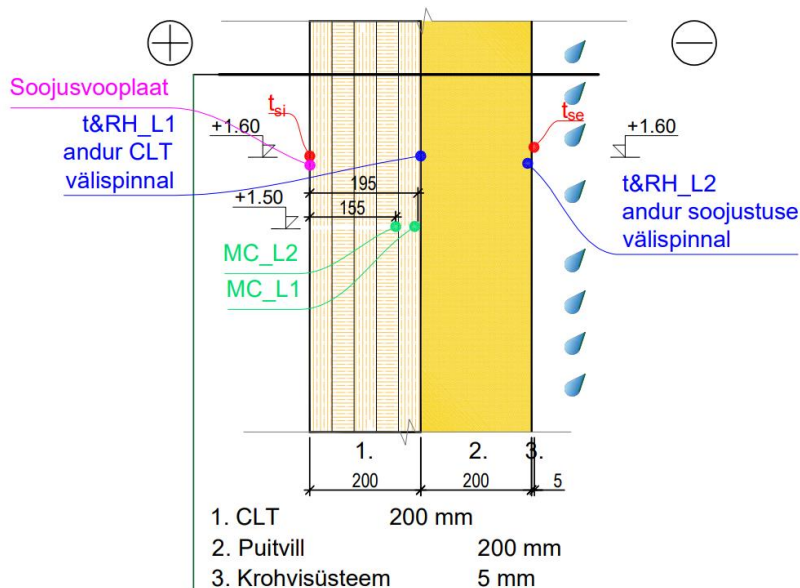


Joonis 23. Testhoone seinalõikude ristlõiked loendatud kasutatud materjalidega.

Tootja poolt deklareeritud soojuseri juhtivus on väärtus, mis on hinnanguline, põhinedes temperatuuri ja õhuniiskuse referentstingimustel saadud mõõtmistulemustel, on antud kindlaksmääratud kvantiili ja usaldusnivoo kohta ning vastab normaaltingimustes põhjendatud oodatavale elueale. (EVS-EN ISO 10456:2008) Materjali soojusjuhtivuse tegur iseloomustab soojuse hulka, mis läbib ühe ruutmeetri suurust ja ühe meetri paksust materjalikihti olukorras, kus materjalikihi pinnatemperatuuride vahe on 1 K. Veeauru difusioonitakistustegur iseloomustab suhet materjali veeauru läbilaskvusest samal temperatuuril oleva sama pakus õhu kihi veeauru läbilaskvusega. (EVS-EN ISO 12572:2016)

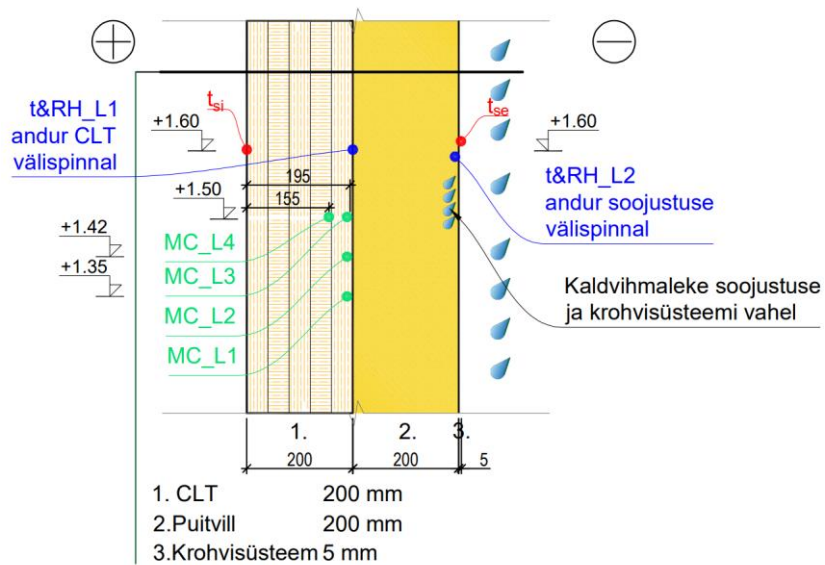
Referents seinas 41, kus veeleket ei imiteeritud ning auru- ja õhutõkkekile puudus olid paigutatud temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andurid soojustuse ja CLT vahele ning

soojustuse ja krohvi vahele. Kusjuures temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andurid olid paigutatud kõikides seinalõikudes identselt, välja arvatud lõigud 44 ja 45, kus mõõdeti tulemusi nii auru- ja õhutõkke kihist puidu pool kui ka soojustuse pool. Puidu niiskussisaldust mõõdeti kahes punktis, samal kõrgusel sügavusel 180mm ja 140mm. Lõigu 41 ristlõige toodud Joonis 24. Kõikidel seinalõikudel mõõdeti ka pinnatemperatuure, nii välist kui ka seesmist pinnatemperatuuri.



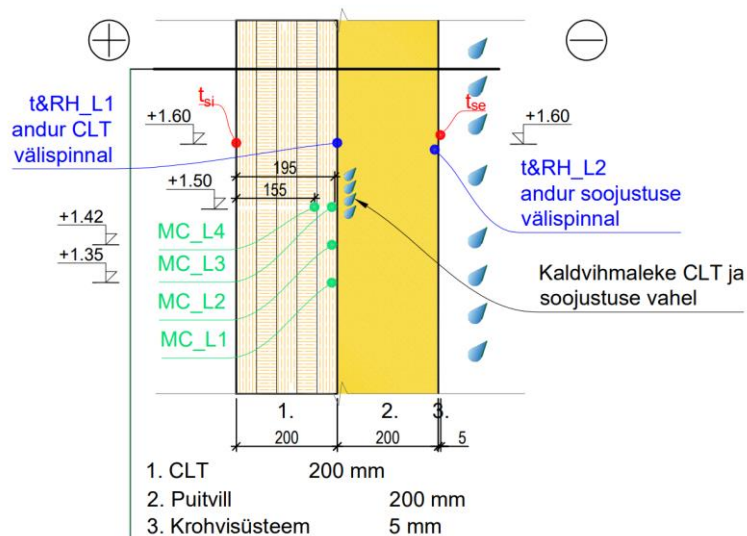
Joonis 24. Seinalõigu 41 ristlõige.

Seinalõigul 42 imiteeriti kaldvihmaleket soojustuse ja krohvi vahelises kihis. Puidu niiskussisaldust mõõdeti neljas erinevas punktis. Sügavusel 180mm kolmes punktis, ülal keskel ja all (kõrguste vahed üksteisest). Ülal paiknevas mõõtepunktis mõõdeti puidu niiskust ka Sügavusel 140mm. Lõigu 42 ristlõige toodud Joonis 25.



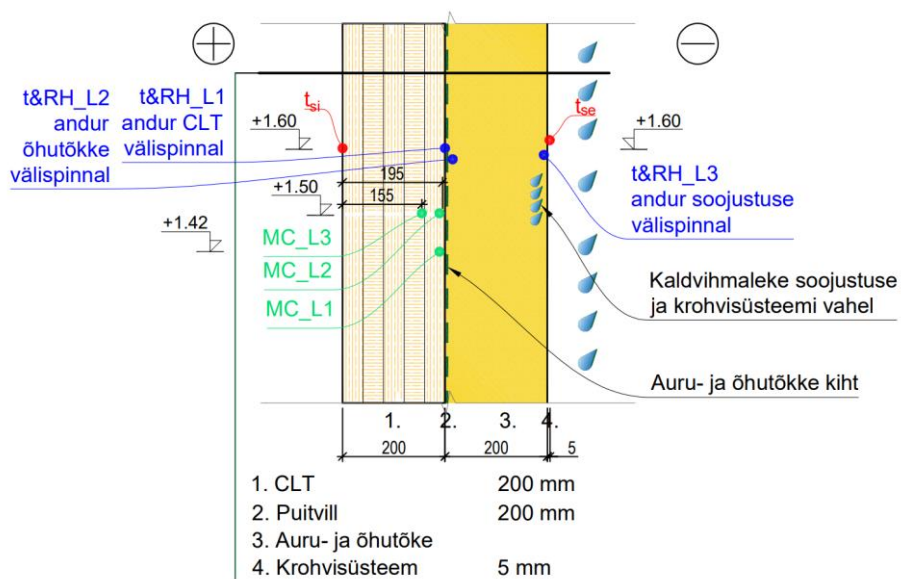
Joonis 25. Seinalõigu 42 ristlõige.

Seinalõik 43 teostati sisuliselt samamoodi nagu 42, aga erinevalt lõigust 42 imiteeriti kaldvihmaleket puidu ja soojustuse vahelises kihis. Lõigu 43 toodud Joonis 26.

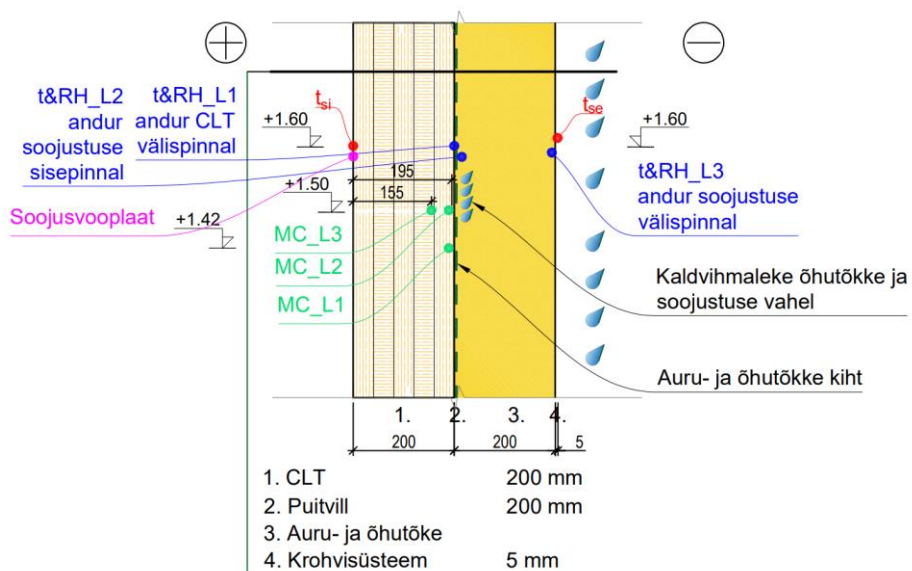


Joonis 26. Seinalõigu VS-4.3 ristlõige.

Seinalõikudesse 44 ja 45 paigaldati lisaks eelnevatele testseinalõikudele ka auru- ja õhutõkke kile. Puidu niiskussisaldust mõõdeti erinevalt eelmistest lõikudest vaid ülemises ja keskmises mõõtepunktis. Lõigul 44 imiteeriti veeleket krohvi taga ning lõigul 45 imiteeriti veeleket puidupaneeli ja soojustuse vahel. Lõigu 44 ristlõige toodud Joonis 27, lõigu 45 ristlõige Joonis 28.



Joonis 27. Seinalõigu 44 ristlõige.



Joonis 28. Seinalõigu 45 ristlõige.

2.1.3 Uuritava välispiirde ehitusfüüsikaliste omaduste määramine

Selles töös arvutati testhoone seina soojuslähivus standardi EVS-EN ISO 6946:2017 järgselt. Kuna uuritav konstruktsioon koosneb homogeensetest kihtidest, siis saame leida seina soojuslähivuse, ehk U-arvu, järgnevate valemitega:

$$U = \frac{1}{R_T}, \quad \frac{W}{m^2K} \quad (1)$$

Kus:

R_T – piirde kogusoojustakistus, $(m^2K)/W$

$$R_T = R_{Si} + R_1 + R_2 + R_N + R_{Se}, \quad \frac{m^2K}{W} \quad (2)$$

Kus:

R_{Si} – piirde sisepinna soojustakistus $(m^2K)/W$;

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

R_{Se} – piirde välispinna soojustakistus $(m^2K)/W$;

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad \frac{m^2K}{W} \quad (3)$$

Kus:

d – materjalikihi paksus, m;

λ – materjali arvutuslik soojuseri juhtivus $W/(mK)$

	Soojusvoo suund		
	Üles (lagi)	Horisontaalne (sein)	Alla (põrand)
$R_{Si} (m^2K)/W$	0.10	0.13	0.17
$R_{Se} (m^2K)/W$	0.04	0.04	0.04

Tabel 2. Piirde pindade soojustakistused piirdetarindi soojuslähivuse arvutamisel. EVS-EN ISO 6946:2017

Kasutades materjalide deklareeritud väärtusi Tabel 1 ning arvestades paneeli niiskuse keskmiseks väärtuseks katseperioodi vältel 9% saame paneeli soojuseri juhtivuseks $0.12 \frac{W}{mK}$. Nende andmetega saame seina soojuslähivuseks $0.145 \frac{W}{m^2K}$.

Testseintele anti esialgne niiskustehnilist toimivust kirjeldav hinnang kastepunkti meetodil, mis on toodud standardis (EVS-EN ISO 13788:2012). Tarindite erinevates kihtides arvutati veeauru osarõhud andurite salvestatud temperatuuride ja suhteliste õhuniiskuste andmete põhjal. Küllastusrõhkude leidmiseks kasutati empiirilisi valemeid:

$$p_{sat} = 610,5e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3+T}}, \text{ kui } T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$p_{sat} = 610,5e^{\frac{21,875 \cdot T}{265,5+T}}, \text{ kui } T < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

Kus:

T - temperatuur, $^\circ\text{C}$

Veeauru osarõhkude leidmiseks kasutati valemit (6):

$$RH = \frac{p}{p_{sat}} * 100, \% \quad (6)$$

Kus:

p - veeauru osarõhk, Pa

p_{sat} - veeauru küllastusrõhk, Pa

RH - suhteline õhuniiskus, %

Piirde kihtide veeauru osarõhkude jaotus arvutati kahel pool piiret olevate osarõhkude ning materjalikihtide veeauru takistuste abil valemiga (7). Veeauru osarõhk tasandub piirdes vastavalt materjalikihtide veeaurutakistuste suhtele.

$$p_n = p_{in} - \frac{Z_n}{Z_t}(p_{in} - p_{out}), \quad Pa \quad (7)$$

Kus:

p_{in} - siseõhu veeauru osarõhk, Pa

p_{out} - välisõhu veeauru osarõhk, Pa

Z_n - arvutatavale pinnale eelnevate materjalikihtide aurutakistus, $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$

Z_t - tarindi koguaurutakistus, $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$

Materjalide veeaurutakistused arvutatakse valemist 8:

Võrrand

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p}, (m^2 * s * Pa)/kg \quad (8)$$

$$\mu = \frac{\delta_{p,\delta hk}}{\delta_p},$$

Kus:

Z_p - materjalikihi veeauru takistus, $(m^2 * s * Pa)/kg$

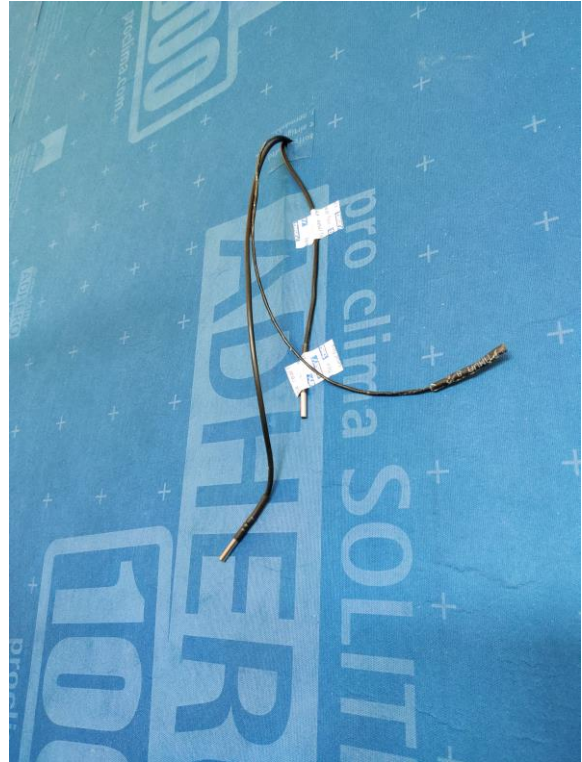
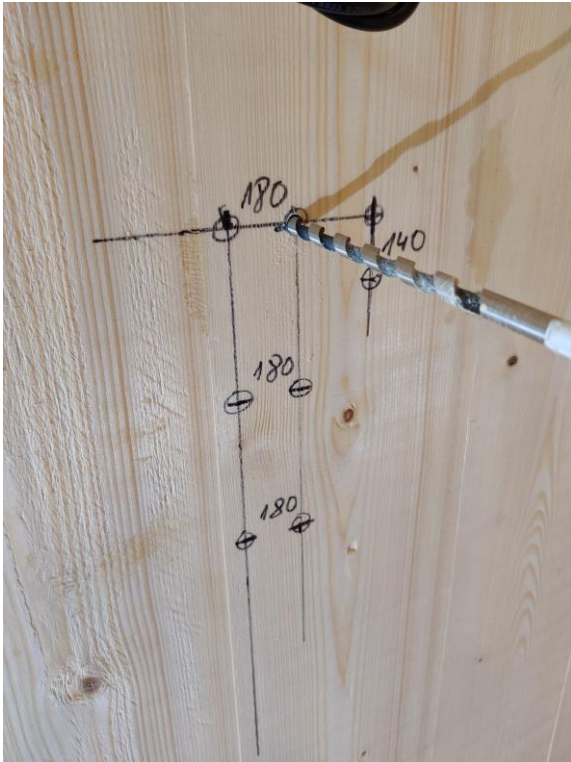
d - materjali kihi paksus

$\delta_{p,\delta hk}$ - õhu veeauru juhtivus $\sim 2 * 10^{-10}, kg/(m * s * Pa)$

μ - materjali veeauru difusioonitakistustegur

2.1.4 Mõõtevahendid

Katseandmete salvestamiseks paigaldati temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andureid nii soojustuse ja ristkihtliimpuitpaneeli vahele kui ka soojustuse ja välisviimistluse kihi vahele. Andurite paigutus sõltus seinalõigust. Niiskussisaldust 200mm paksuses ristkihtliimpuitpaneelis mõõdeti nii 180mm sügavusel kui ka 140mm sügavusel. Temperatuuri ja suhtelist õhuniiskust mõõdeti anduritega: A-1 Humisense (mõõtetäpsus $T = \pm 0.3^\circ\text{C}$ temperatuurivahemikus 0° kuni 60°C ; $\text{RH} = \pm 2.0\%$ vahemikus 0% kuni 100%). Pinnatemperatuure mõõdeti temperatuurianduritega Uniflex t_s (mõõtetäpsus $T = \pm 0.5^\circ\text{C}$ temperatuurivahemikus -10° kuni 85°C). Tulemusi salvestati ühe tunnise intervalliga. Tarindis soojusvoo mõõtmiseks kasutati Hukseflux HFP01 soojavooplaate mõõtetäpsusega $\pm 3\%$. Soojusvoo plaatidel salvestati tulemusi 10-minutilise intervalliga. Andurite paigaldus näidatud Joonis 29, kogu paigaldatud mõõtesüsteem Joonis 30.

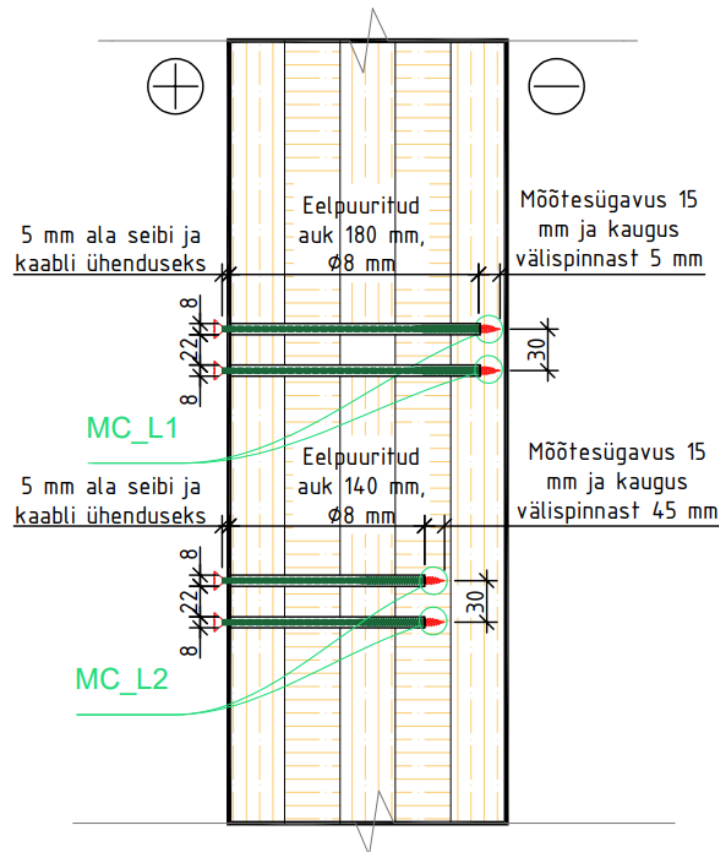


Joonis 29. Paneeli niiskussisalduse mõõtevade puurimine ning temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse andurid A-1 Humisense ning pinnatemperatuuri andur Uniflex t_s .



Joonis 30. Testmajja paigaldatud mõõtesüsteem.

Niiskussisaldust mõõdeti roostevabast terasest elektroodkruvide abil, $\varnothing=5\text{mm}$ ja olenevalt mõõtepunktist sügavusel 180mm ja 140mm. Kruvid paigaldati valitud sügavustele niimoodi, et elektroodotsad asetseksid lamellikihi tsentris. Elektroodkruvide paigaldamisel pöörati ka erilist tähelepanu kruvi suundadele puidu kiu suhtes, kuna puitmaterjal on pikikiu suunas pea poole väiksem elektritakistus kui risti kiudu. ("Moisture Content of a Piece of Sawn Timber" 2002) Elektroodkruvide põhimõtteline skeem näidatud Joonis 31.



Joonis 31. Elektroodkruvide põhimõtteline skeem.

Kruvide paigaldamiseks olid igasse mõõtepunkti vastavalt kruvi pikkusele ette puuritud augud, $\varnothing=8\text{mm}$. Kuna CLT paneeli niiskus võib ristlõikes oluliselt erineda olid kruvid õige mõõtetulemuse saamiseks isoleeritud ka spetsiaalse termokahaneva isoleertoruga. Sellist töövõtet soovitab ka EVS-EN 13183-2:2002 ("Moisture Content of a Piece of Sawn Timber", 2002). Kruvi otste mõõtesügavuseks valiti 15mm. Kruvid olid valitud ümarpeaga, et oleks lihtne paigaldada ka mõõteanduri kaablid. Kaabliotsete ja seina omavahelise otsese kontakti vältimiseks kasutati ka distantssseibe, 1 plastikust ja 1 metallist, kokku 5mm. Et tulemused oleksid veelgi täpsemad kasutati elektroodkruvi seina laskmisel ka isoleermastiksit Sika Sikaflex 291i, et takistada seina kruvi asukohast välja kuivamist. Seina paigaldatud elektroodkruvid näidatud Joonis 32.



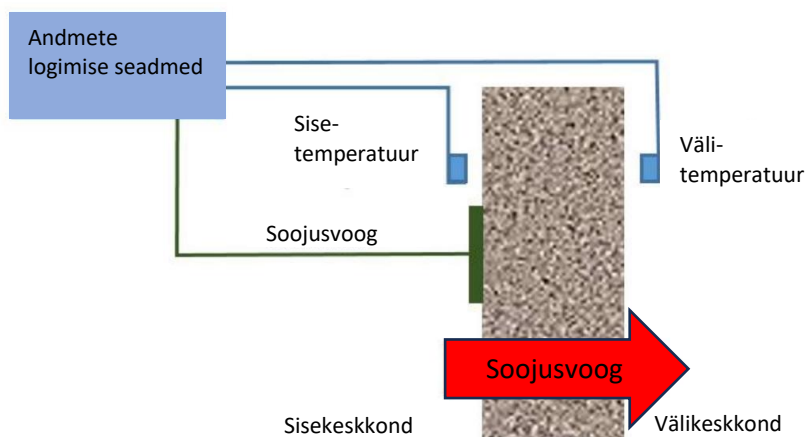
Joonis 32. Lõplikult paigaldatud, mastiksiga isoleeritud elektrod kruvid. (Testmaja pildikogu, 2023)

2.1.5 Kohapealsed soojusvoo mõõtmised

Soojavooplaate kasutamine võimaldab ka kohapealses situatsioonis mõõta konkreetse tarindi soojusläbivust. Elemendi U-väärtusi on võimalik leida soojusvoo mõõtmisel soojusvoo mõõturiga registreerides samal ajal ka elemendi mõlemal küljel olevaid pinnatemperatuure. Selle protsessi ajal on tähtis, et oleks tagatud püsiseisundi tingimused, et hinnatav tulemus oleks ka adekvaatne. Kuna reaalses situatsioonis püsiseisundi tagamine on küllaltki keeruline, on standardis BS ISO 9869-1:2014 välja toodud lähenemisviis, et hinnata, kas registreeritud soojusvoog ja temperatuuride keskmised väärtused sobivad korrektsete tulemuste saavutamiseks või ei.

Kergekaaluliste elementide mõõtmisel, mille soojusmahtuvus on vähem kui $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ tuleks mõõtmisi teostada 1 tund peale päikesesoojangut kuni päikesetõusuni, et vältida päikesest põhjustatud mõjutusi. Testi tulemused võib pidada õigeks kui 3 järjestikku mõõdetud õhtut ei erine tulemus rohkem kui 5%. Selles uurimistöös arutati seina soojusläbivused 2023 aprill soojusvooandmete põhjal, ajavahemikus 00:00 – 04:00. Soojusvooplaate paigaldusskeem on toodud **Tõrge! Ei leia viiteallikat..**

Soojusvoo mõõtmise skeem:



Joonis 33. Soojusvoo plaatide paigaldusskeem. (BS ISO 9869-1:2014)

Saadud soojusvoo tulemustest on võimalik arvutada hetkeline seina soojuslähivus, ehk U -arv, jagades soojusvoo temperatuuride vahega võrrand (9) näitel.

$$U = \frac{\sum q}{\sum (T_i - T_e)}, W/(m^2 K) \quad (9)$$

Kus:

U - seina soojuslähivus, $W/(m^2 K)$

$\sum q$ - soojusvoog, W/m^2

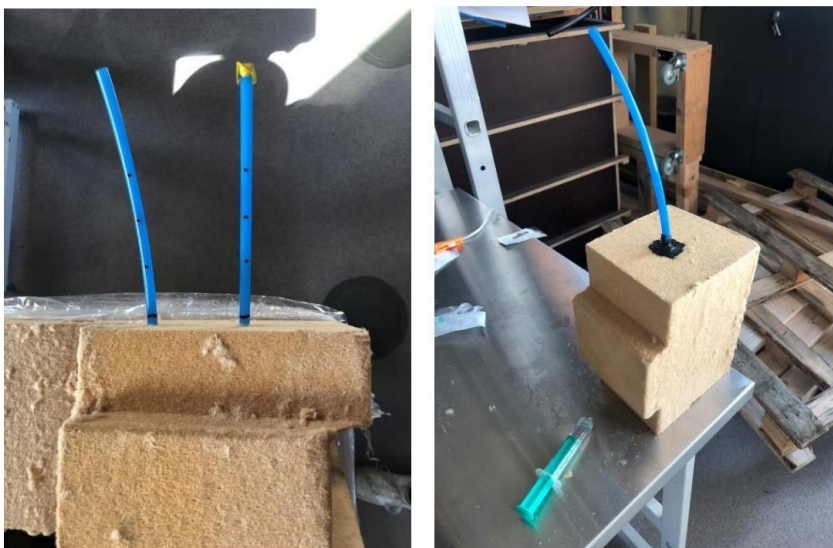
T_e - välisõhu temperatuur, K

T_i - siseõhu temperatuur, K

2.1.6 Soojustuse veeimavus, lekke imiteerimine

Puitkiud soojustusplaat on hea soojusisolatsioonimaterjal, mille on lisaks headele soojustakistuse näitajatele ka väga head niiskustehnilised omadused. Puitkiust isolatsiooniplaat paistab teiste soojustusmaterjalide kõrvalt silma oma väga suure niiskusmahtuvusega, mis on tähtsaks teguriks seinas stabiilse niiskusrežiimi säilitamisel.

Uurimustöö käigus katsetati puitkiust soojustuse veeimavust, puurides katsekehadesse 8mm avad, misjärel paigaldati sinna veetorud, kuhu süstlaga vett lisades hinnati materjali imavust, Joonis 34. Üllatuseks tuli, et hoolimata materjali suurest niiskusmahtuvusest imub puuritud avade kaudu vesi suhteliselt aeglaselt. 8mm läbimõõduga torust mõne milliliitri vee imbumiseks kulus mitu päeva.



Joonis 34. Katsekehad puitkiudplaadi Steico Protect M Dry veeimavuse hindamiseks. (Saare, 2023)

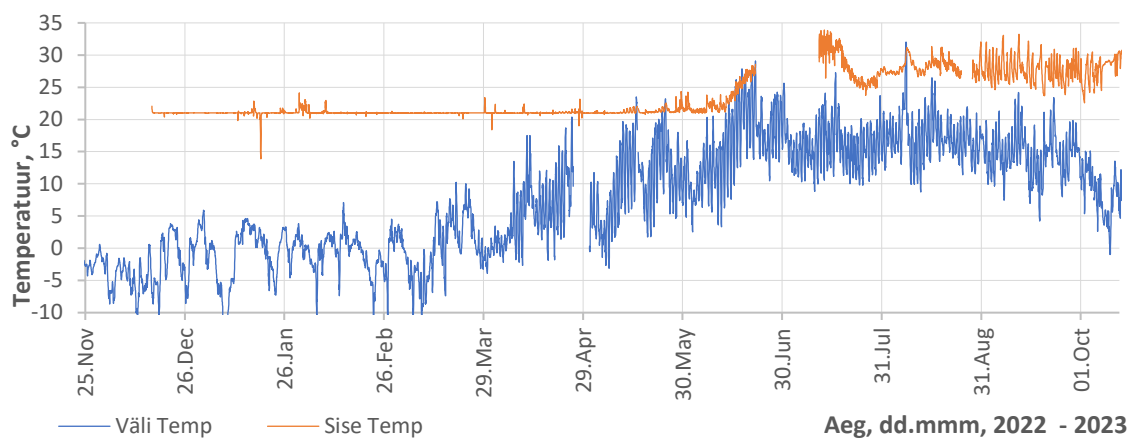
Vihmaleket imiteerivatesse seinalõikudesse paigaldati 8mm läbimõõduga toru, mille kaudu doseeriti süstlaga nädalane arvatud vee kogus. Mõõtepunktides, kus toru imiteeris leket paneeli ja soojustuse vahelises kihis puuriti väljast avad ning paigaldati toru soojustuse sisemisest pinnast, ehk paneeli poolsest pinnast 5mm soojustuse sisse. Veetorude ühenduse veekindlamaks muutmiseks isoleeriti torud soojustuse pinnalt ka mastiksiga. Joonis 35 Mõõtepunktides, kus rakendati leke krohvi ja soojustuse vahele tehti soojustusse väljast poolt süvend kuhu paigaldati samuti veetorud läbimõõduga 8mm. Kuna soojustuse veeimavus oli sedavõrd väike kaeti veetorude vabad otsad ka teibiga, kuhu siiski tehti pisikesed augud, et mitte tõkestada vee imendumist.



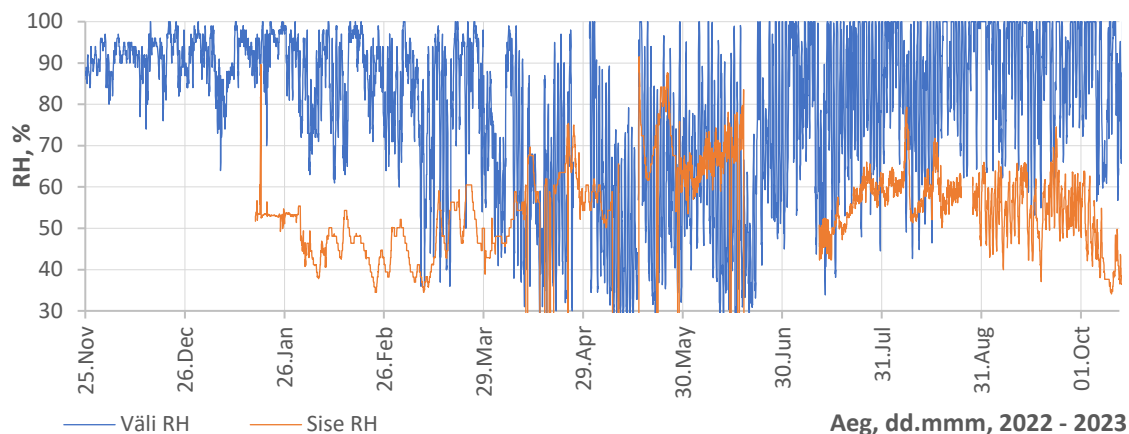
Joonis 35. Veetoru paiknemine paneeli ja ristkihtliimpuitpaneeli vahel ning mastiksiga isoleeritud veetoru soojustuse pinnal. (Saare, 2023)

2.1.7 Väliskliima

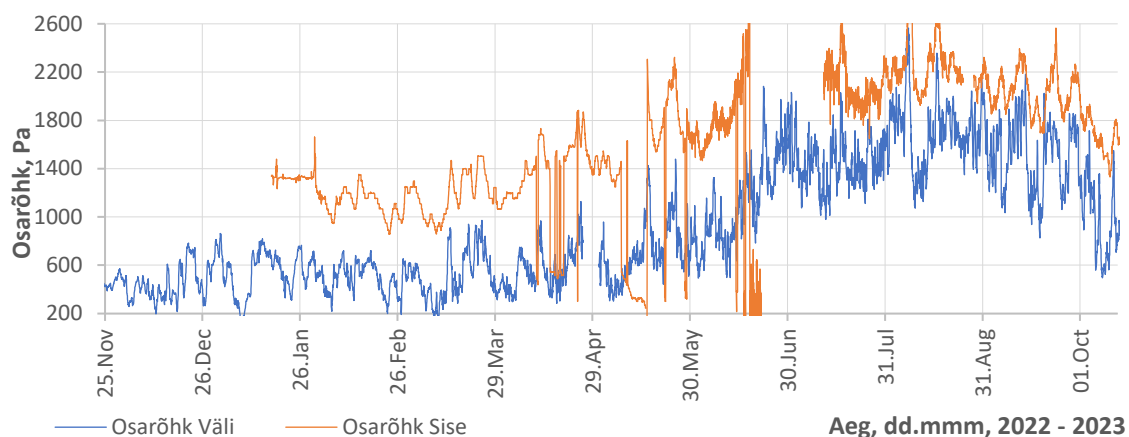
Testmaja paigaldati Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse 3 hoovile. Väliskliima andmed saadi iganädalaselt Tallinn-Harku ilmajaamast ning testmaja kõrval asuvast Liginullenergia maja katusel olevast ilmajaamast. Kogu mõõteperioodi jooksul muutus temperatuur vahemikus -10°C kuni $+30^{\circ}\text{C}$.



Joonis 36. Väli- ning sisekliima temperatuurid kogu mõõteperioodi jooksul.



Joonis 37. Väli- ning sisekliima suhtelised õhuniiskused kogu mõõteperioodi jooksul.



Joonis 38. Väli- ning sisekliima veeauru osarõhud kogu mõõteperioodi jooksul.

2.1.8 Sisekliima

Testhoone sisekliima on kirjeldatud joonistel Joonis 36 Joonis 37 Joonis 38. Testmajas loodi stabiilne sisekliima, mis tagati elektriküttega, soojuskehaks oli radiaator. Ruumitemperatuur oli valdavalt 21°C, suvisest perioodist alates alustati kuivatustsüklitega, mille käigus kõikus temperatuur 25°C ja 30°C vahel. Suhteline õhuniiskus testmajas jäi valdavalt 40% ja 70% vahele. Ruumisisene niiskuslisa tekitati õhuniisutiga Philips Nano Cloud, mille abil reguleeriti ruumis niiskuslisa vastavalt soovitud. Et vältida õhu kihistumist ja seeläbi valesid testitulemusi paigaldati ruumi temperatuuri ja õhuniiskuse ühtlaseks jaotamiseks ka ventilaator. Lisaks isoleeriti ruumis olnud radiaator külgedelt EPS-plaatidega vältimaks soojuskiirguse mõju seintele paigaldatud soojavoo plaatidele.

2.2 Arvutusmetoodika

2.2.1 Kaldvihma arvutamine

Kaldvihma arvutamiseks lähtuti metoodikast, mis on kirjeldatud standardis (EVS-EN ISO 15927-3:2009). Kaldvihma arvutuseks vajalikud andmed nagu tunnipõhine sademete hulk, tuule suund ja tuule kiirus saadi kõrvvalhoonesse ehitatud ilmajaamalt. Standardis toodud meetod arvestab ka topograafia, kohaliku varjestuse ning seinavõimalikke erinevaid iseärasusi.

Kaldvihma kogus avatud maastikul arvutatakse valemiga (10):

$$I'_s = \frac{2}{9} \sum v r^{\frac{8}{9}} \cos(D - \theta), \left[\frac{l}{m^2}\right] \quad (10)$$

Kus:

I'_s - vihma kogus avatud maastikul $\left[\frac{l}{m^2}\right]$

v – tunnipõhine keskmine tuule kiirus $\left[\frac{m}{s}\right]$

r – tunnipõhine vihma kogus [mm]

D – tunnipõhine keskmine tuulesuund põhjasuuna suhtes [$^{\circ}$]

θ – seinavõimalikke erinevaid iseärasusi

Eelneva valemiga saadud tulemus annab vihmakoguse, mis vastaks avatud väljal sadavale kogusele. Et teisendada see tulemus ümber konkreetsele seinale on korrutatakse tulemus läbi maastikuteguriga C_R , topograafilise koefitsiendiga C_T , takistusteguriga O ja seinateguriga W nagu järgnevas valemis on toodud.

$$I_{WS} = I'_s C_R C_T O W \quad (11)$$

Kus:

I_{WS} – vihma kogus seinal $\left[\frac{l}{m^2}\right]$

I'_s – vihma kogus avatud maastikul $\left[\frac{l}{m^2}\right]$

C_R – maastikutüübi tegur

C_T – topograafiline koefitsient

O – takistuse tegur

W – seinategur

Maastikutegur C_R võtab arvesse keskmise tuule kiiruse võimalikku varieeruvust tulenevalt seina kõrgusest maapinnast ning ümbritseva keskkonna iseloomust. Testmaja puhul valiti teguriks $C_R = 0,722$. Topograafiline koefitsient arvestab võimalikke ümbritsevaid künkaid ja mägesid. Kuna testhoone ümbruses on tasane maastik valiti koefitsiendiks $C_T = 1$. Takistustegur võtab arvesse ümbritsevate seinte mõju, mis on vähemalt sama kõrgeid nagu arvutatav sein. Testhoone kõrval asuv vähemalt sama kõrge sein on ligikaudu 30 meetri kaugusel, seega valiti teguriks $O = 0,4$. Kuna testmaja puhul on tegemist lamekatusega, valiti seinateguriks $W = 0,4$.

Standardi põhjal leitud vihmakogused summeeriti omavahel nädalate kaupa. Summeeritud kogustest arvestati lekke suuruseks 1%.

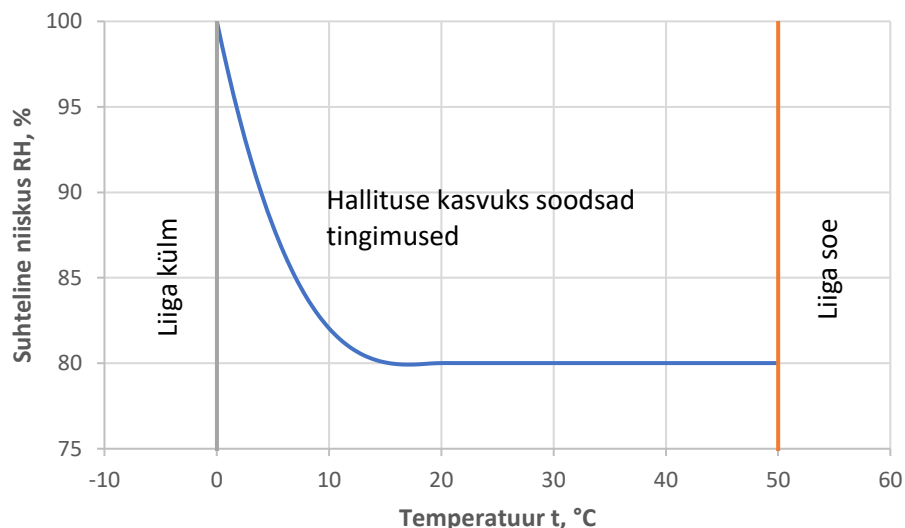
2.2.2 Hindamiskriteeriumid

Puidu pinnal hallituse kasvuks on vajalikud kindlad tingimused. Hallituse kasvu mõjutavad keskkonna õhuniiskus, temperatuur, nende ekspluatatsiooni aeg ja materjali pinna omadused. Selles töös hinnati hallituse Viitaneni meetoodika järgi (Viitanen et al., 2011), mille kohaselt hallituse kasvuks sobilikke temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse vahemikke kirjeldab matemaatiline diagramm, Joonis 39. Selle kohaselt on hallituse kasvuks sobilik temperatuuri vahemik $0^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ ning kriitilise suhtelise õhuniiskuse piiri määrab temperatuurist sõltuv funktsioon, mida kirjeldab valem (12):

$$\begin{aligned} RH_{crit} &= -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100, & \text{kui } T \leq 20 \\ RH_{crit} &= 80\% , & \text{kui } T > 20 \end{aligned} \quad (12)$$

Kus:

T – temperatuur, $^{\circ}\text{C}$



Joonis 39. Hallituse kasvuks soodsad tingimused (Viitanen & Ojanen, 2007)

(Viitanen et al., 2011) täpsustatud hallituse kasvu hindamismudelil vaadeldakse hallitusindeksit, mida arvutatakse valemi (13 abil ning mille väärtused on toodud allolevas Tabel 5. Hallitusindekiste arvutamisel mängivad suurt rolli materjali tundlikkuse klassid ning hallituse kahanemistegurid, mis on toodud Tabel 3 Tabel 4.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 * \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02)} k_1 k_2 \quad (13)$$

Kus:

M – hallitusindeks, - ;

t – aeg, nädalates;

W – puiduliik (mänd = 0, kuusk = 1)

SQ – materjali pinnakvaliteet (0 – kamberkuivatis kuivatatud puit, 1 – õhu käes kuivatatud puit)

k_1 – korrelatsioonikoefitsient

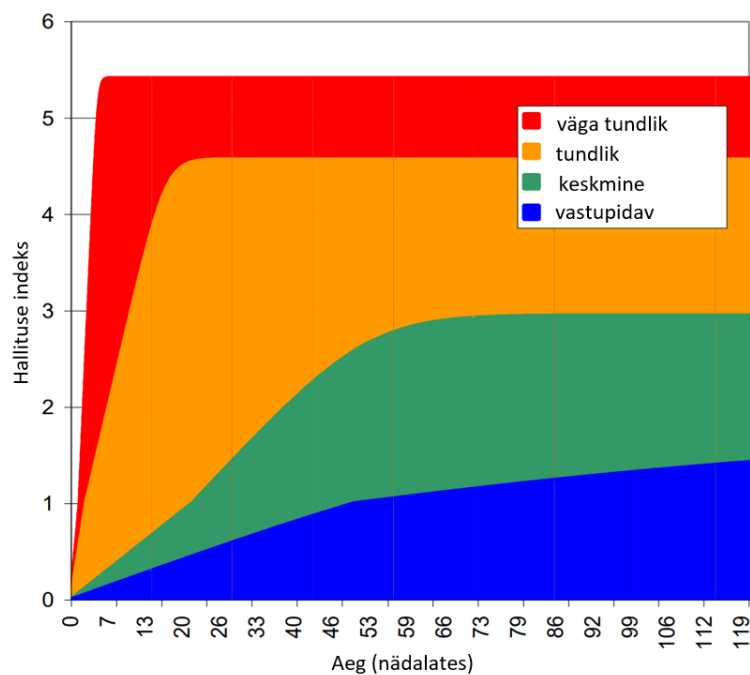
k_2 – hallituse kahanemistegur

Tabel 3. Materjalide tundlikkuse klassid näitlikustavate materjalidega. (Viitanen et al., 2011)

Tundlikkuse klass	Materjalid
1	Männi maltspuu
2	Liimitud puidust lamellid, paberpinnaga PUR, kuusk
3	Betoon, mullbetoon, klaasvill
4	Poleeritud pinnaga PUR

Tabel 4. Hallituse kahanemistegurite väärtused kirjeldustega. (Viitanen et al., 2011)

Hallituse kahanemise tegur	Kirjeldus
1	Mänd tavalises mudelis, lühiajalisel perioodil
0.5	Märgatav hallituse taandumine
0.25	Väga madal hallituse taandumine
0.1	Hallitus ei taandu peaaegu üldse



Joonis 40. Erinevate hallitusindeksite korral kahjustuste tekkimise ajad nädalates. (Viitanen & Ojanen, 2007)

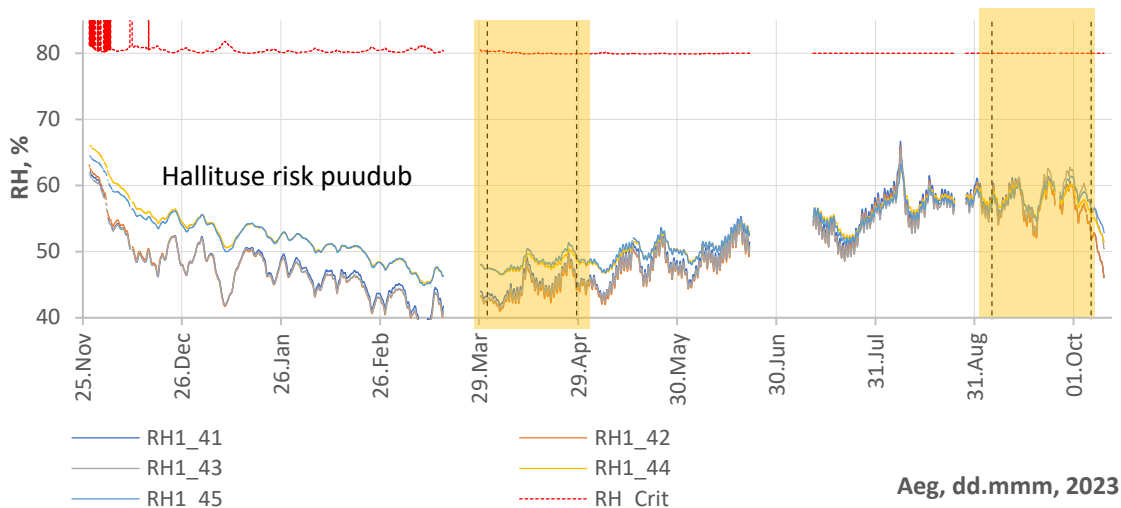
Tabel 5. Hallitusindeksitele vastavad kirjeldused. (Viitanen et al., 2011)

Indeks	Hallituskasvu kirjeldus
0	Hallitus puudub
1	Esmased mikriskoopilised lokaalsed hallitusalged
2	Mitmed mikriskoopilised lokaalsed hallituskolooniad
3	Visuaalsed hallituse ilmingud, < 10% materjali pinnast
4	Visuaalsed hallituse ilmingud, < 50% materjali pinnast
5	Mõõdukas hallituse kasv, >50% materjali pinnast
6	Tugev hallitus, 100% materjali pinnast

3 TULEMUSED

3.1 Testseintes suhteliste õhuniiskuste ja temperatuuride mõõtetulemused

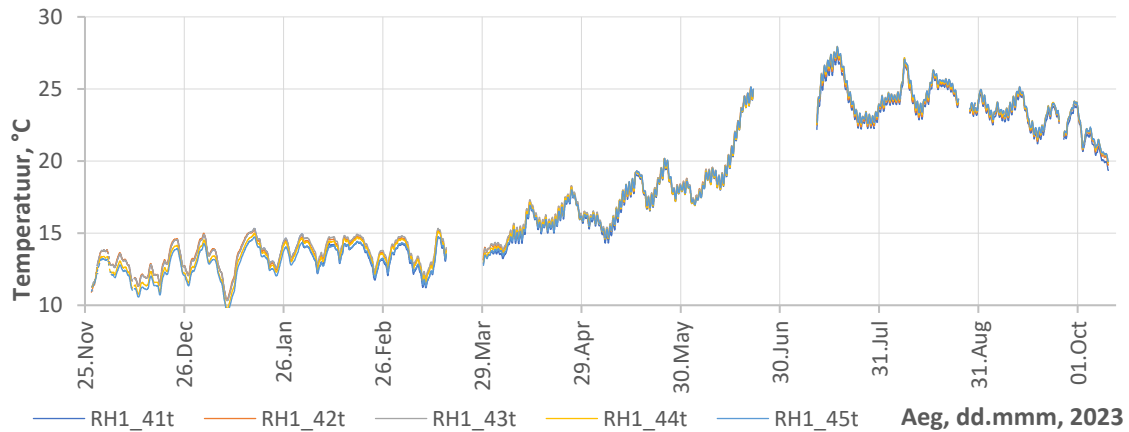
Uuritud seinalõikudel soojustuse ja ristkihtliimpuidu vahelises kihis mõõdetud suhtelise õhuniiskuse ja temperatuuride andmed on toodud Joonis 41 ja Joonis 42. Suhteliste õhuniiskuste graafikudel on näidatud ka kriitilise õhuniiskuse piir, mis on arvatud vaadeldava asukoha temperatuuride järgi (12). Paralleelselt on toodud ka andmed sise- ning väliskliima kohta, mis on toodud Joonis 43, Joonis 44, Joonis 45. Joonis 41, mis kirjeldab suhtelise õhuniiskuse väärtusi puidu ja villa vahelises kihis, on kollaselt rõhutatud ka perioodid, millal imiteeriti seintes veeleket.



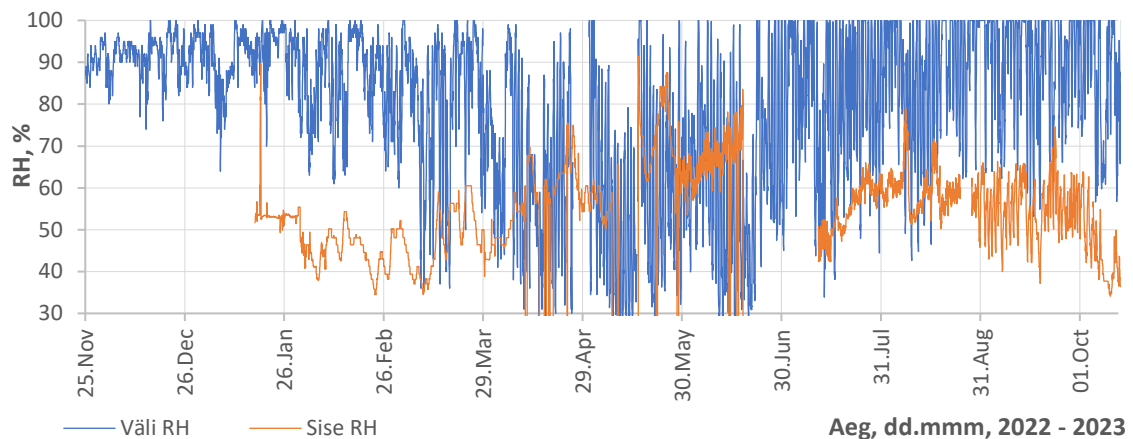
Joonis 41. Suhtelised õhuniiskused seinalõikudel 41-45, puitkiudvilla ja ristkihtliimpuidust paneeli vahel.

Soojustuse ja ristkihtliimpuidu vahelises mõõtepunktis perioodil 2022 sügis – 2023 sügis, Joonis 41, kriitilist olukorda ei tekkinud. Jooniselt on näha, et suhteline õhuniiskuse soojustuse ja puidu vahelises punktis jääb vahemikku 40% kuni 60%, kusjuures omades madalamaid väärtusi kevadisel perioodil ning kõrgemaid suvisel perioodil. Mõlema nii kevadise kui ka sügise süstitud veelekked korral nähtavaid muutusi niiskuse režiimis soojustuse taguses kihis ei toimunud. Need tulemused annavad kinnitust ristkihtliimpuidu veeauru difusiooni kontrollivatele omadustele ning sellele, et puudub vajadus eraldiseisvale aurutõkke kihile.

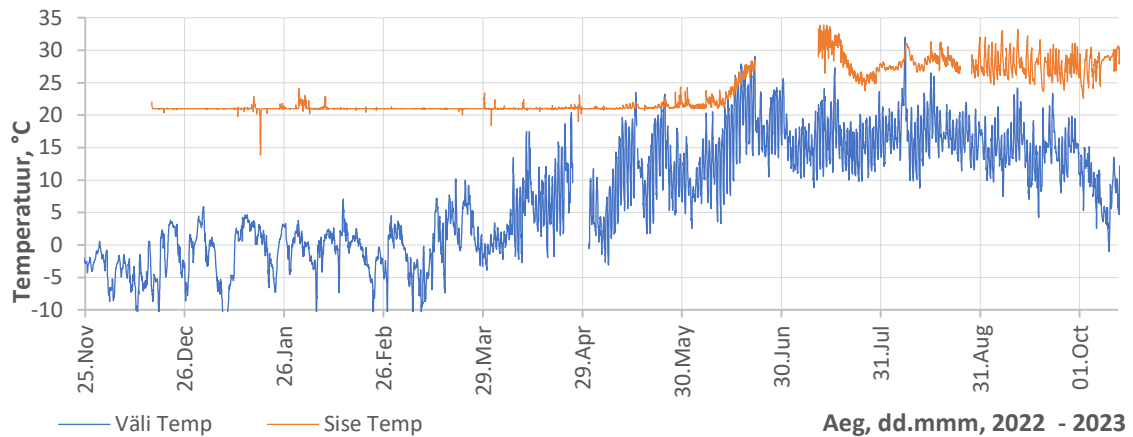
Seinalõikudel 44 ja 45 on näha, kuidas puidu ning soojustuse vahelises kihis, eespool õhu- ja aurutõkke kilet, on suhteline õhuniiskus ligi 5% kõrgem kui teistel seinalõikudel. Suhteline õhuniiskus ühtlustub kõnealus asukohas uuritud seinalõikudel samale tasemele suviseks perioodiks ning sügise saabudes jääb jällegi teistest veidi kõrgemaks.



Joonis 42. Mõõdetud temperatuurid seinalõikudel 41-45, puitkiudvilla ja ristkihtliimpuidust paneeli vahel.

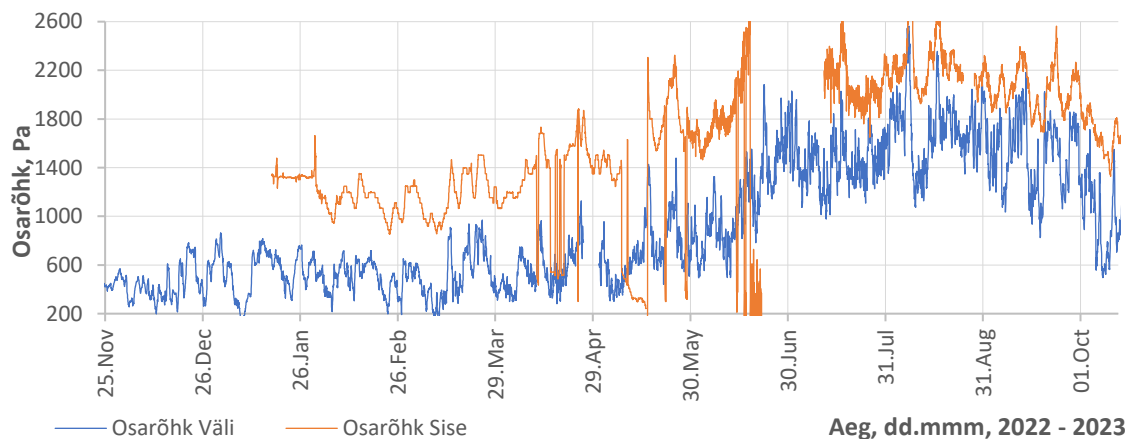


Joonis 43. Mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima suhtelised õhuniiskused.

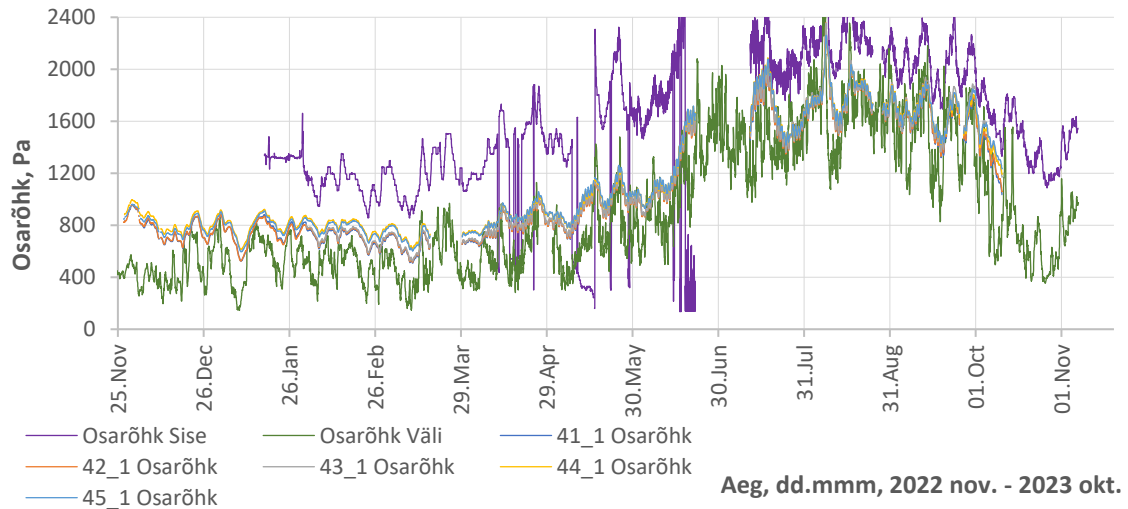


Joonis 44. Mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima temperatuurid.

Graafikuid vaadeldes saab täheldada välis- ning siseveeauru osarõhkude erinevuse langust suvel, millest võiks oletada välispiirdes toimuva difusiooni vähenemist. See võiks olla ka põhjuseks suvisele suhtelise õhuniiskuse tõusule testseintes villa ja puidu vahelises kihis.



Joonis 45. Mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima veeauru osarõhud.

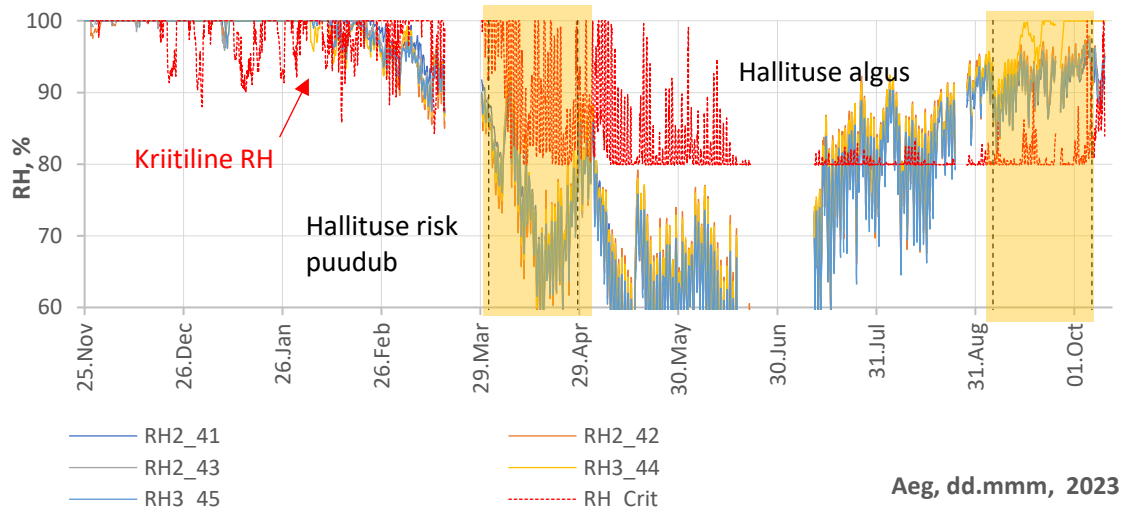


Joonis 46. Mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima ja seinalõikude 41-45 puidu ning villa vahelised veeauru osarõhud.

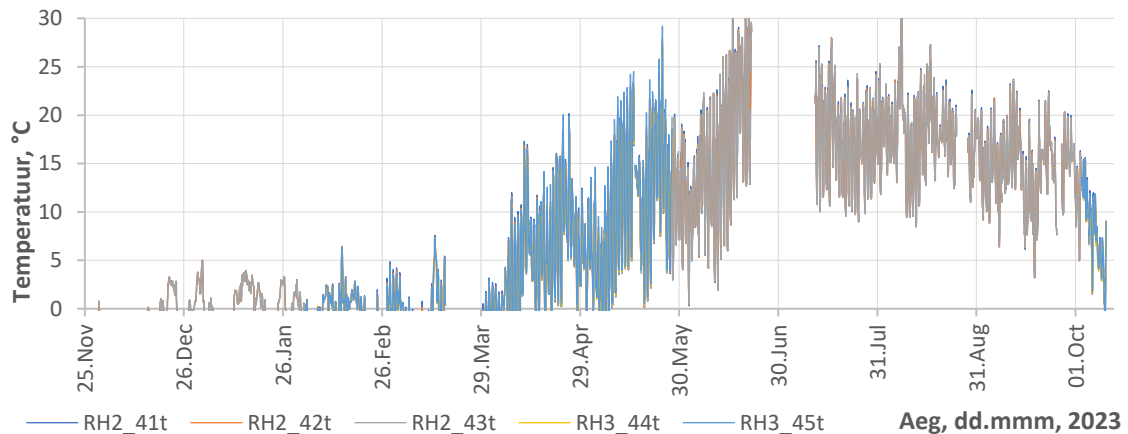
Soojustuse ning krohvi vahelises kihis, Joonis 47, on tulemuste varieeruvus kordades suurem kui on seda puidu ja soojustuse vahelises kihis. Suhtelised õhuniiskused krohvi taguses kihis jäävad vahemikku 60% kuni 100%, temperatuurid jäävad talvisel ajal miinus poolde ning suvisel ajal ulatuvad üle 25 °C, Joonis 48.

Krohvi taguse kihi suhtelise õhuniiskuse Joonis 47 on näha, kuidas peale testmaja paigaldamist 2022 sügisel püsib õhuniiskus pidevalt 100% juures, ületades ka kriitilist suhtelise õhuniiskuse taset, mille korral võib esineda oht hallituse tekkeks soojustuse ja krohvi vahel. Krohvi seisukohast veel suurema tähtsusega ohuks võib pidada krohvi küllastunud niiskussisalduse puhul talviseid külmumistsükke, mis tekitavad seinas viimistluskihis pragunemist soodustades sellega vihmalekke tekkimist seinas ning mõjutab ka krohvi üldist eluiga. Kuigi 100% suhteline õhuniiskus veel ei tähenda, et veega küllastumine toimub, on pikaajase niiskusallika esinemise korral selleks tõenäosus suur. Alates veebruarist hakkab krohvi kihis niiskus välja kuivama ning suhteline õhuniiskus langeb.

Joonis 47 kujutab krohvikihist ehitusaegse liigniiskuse välja kuivamist pärast krohvitööde teostamist. Jooniselt on näha, kuidas 24. oktoober paigaldatud krohvikihit kuivas kuni 80% suhtelise õhuniiskuse tasemeni alles märtsi kuu lõpuks.



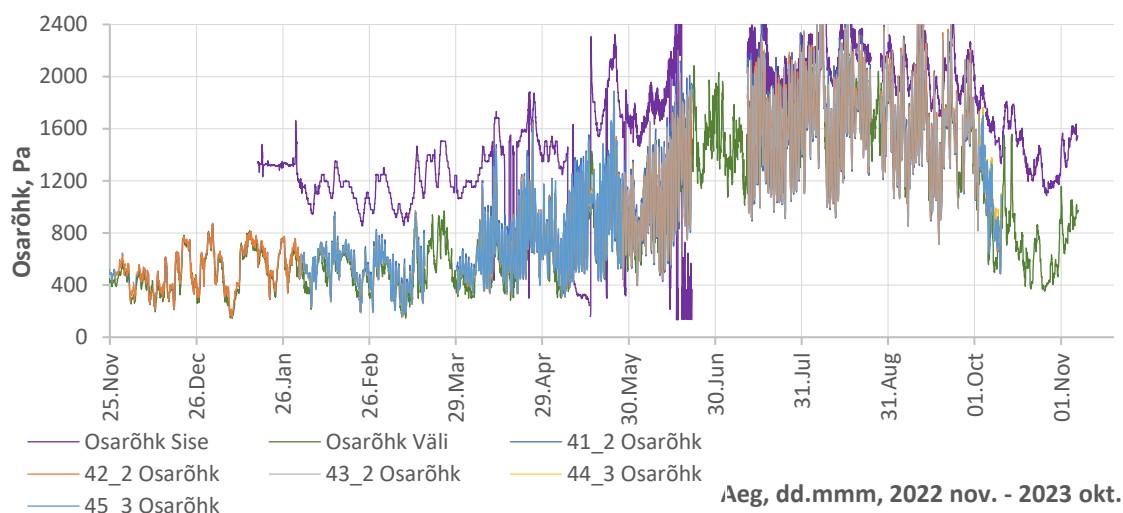
Joonis 47. Mõõteperioodi jooksul registreeritud suhteline õhuniiskus krohvi ja soojustuse vahelises kihis seinalõikduel 41-45.



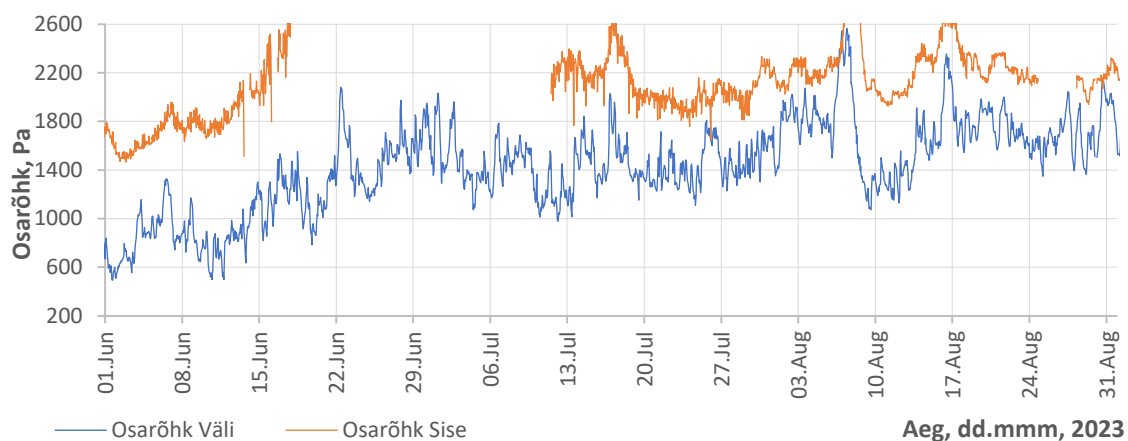
Joonis 48. Mõõteperioodi jooksul registreeritud temperatuurid krohvi ja soojustuse vahelises kihis seinalõikduel 41-45.

Kevadisel lekkeperioodil suhteline õhuniiskus krohvi taguses kihis kriitilist olukorda ei saavutanud. Joonis 47 võib küll näha enam kui 10% suhtelise õhuniiskuse tõusu lekkeperioodi jooksul, kuid kui jälgida sama positsiooni ka väliskliima temperatuurigraafikul saab tähele panna, kuidas sel perioodil on ka temperatuur sarnase trendi järgi muutunud, seega on suure tõenäosusega antud olukord tekitatud väliskliima poolt, mitte seinas imiteeritud veelekkest. Temperatuurigraafiku ning suhteliste õhuniiskuste graafiku üksteisest sõltuvus iseloomustab hästi väliskliima mõju seina niiskusrežiimile, mis nagu analüüsi käigus selgus võib omada välispiirde toimivusele suuremat mõju kui seinas esinev niiskusleke.

Suvised perioodi jooksul on näha, kuidas krohvitaguses kihis ületab suhteline õhuniiskus ka kriitilise piiri, kust alates on oht hallituse tekkeks. Välikliima suhteliste õhuniiskuste Joonis 43 on näha, kuidas suvisel ajal jääb suhteline õhuniiskus kõrgesse vahemikku, enamuse ajast isegi 90% ligidale, mis selgitab ka krohvitaguseid kõrgeid väärtusi.



Joonis 49. Mõõteperioodi jooksul registreeritud veeauru osarõhud krohvi ja soojustuse vahelises kihis seinalõikudel 41-45.



Joonis 50. Suvised sise- ning välisveeauru osarõhud.

Põhjamaades on tihtipeale hoonete välispiirded projekteeritud põhimõtte järgi, et väljas on külm ja niiske ning toas on soe ja kuiv. Nagu Joonis 43 ja Joonis 44 kujutavad jäid selle uurimuse korral aastase mõõteperioodi jooksul väliskliima suhtelised õhuniiskused enamasti pea 90% juurde ning temperatuur ulatus -10°C kuni 30°C . Eelnevalt kirjeldatud eelduste korral jäetakse tähelepanuta seina toimivus suvises olukorras, millal seinas aset leidva veeauru difusiooni suund võib muutuda

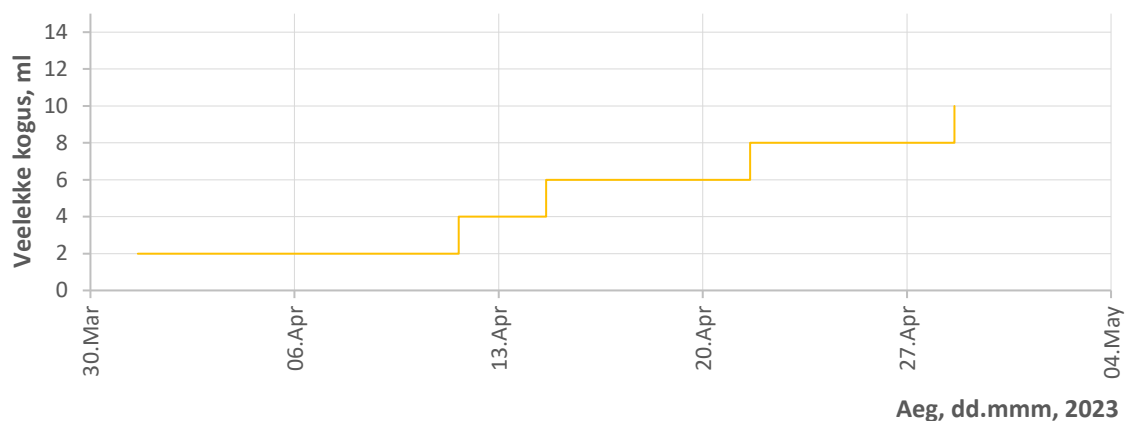
tulenevalt suvistest väga kõrgetest välistemperatuuridest ning õhuniiskustest, mis tingivad sisekliimast kõrgema välikliima veeauru osarõhu.

Üheks uurimistöo eesmärgiks seati välja selgitada, kuidas toimub veeauru difusioon testmajas suvisel perioodil, mil teoreetiliste eelduste kohaselt võib tulenevalt kliimamuutustest võrreldes talvise perioodiga veeauru difusiooni suund omandama vastupidise suuna – väljast sisse. Uurimuse raames taheti uurida, kuidas tuulutamata massiivpuidust välispiirdes kirjeldatud olukord seina niiskusrežiimi mõjutab. Nagu Joonis 50 näitab püsis selles uurimuses terve suvisel perioodi siiski testmajas sees veeauru osarõhk suurem kui väliskliima veeauru osarõhk ning seetõttu ka veeauru difusiooni suund vastupidist olukorda ei saavutanud, mistõttu selles töös antud olukorrale ka hinnangut ei antud.

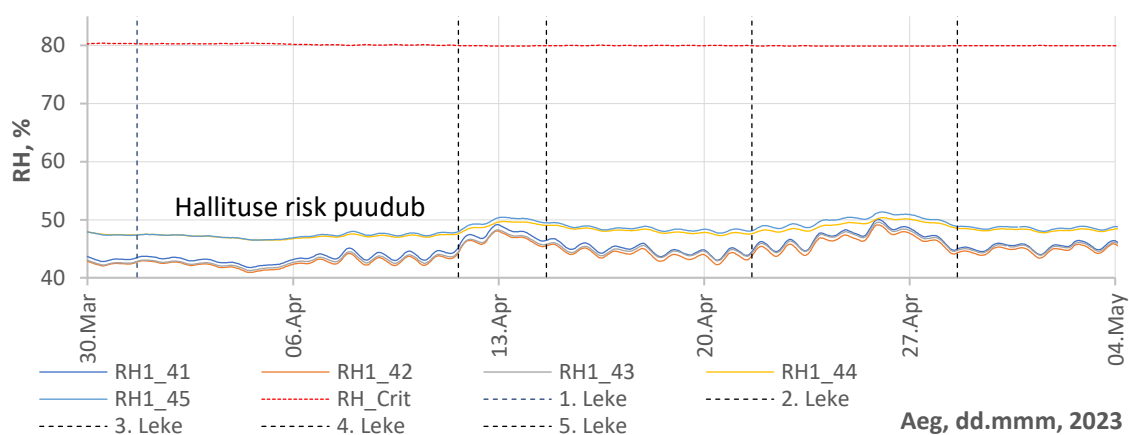
3.2 Testseintes suhteliste õhuniiskuste ja temperatuuride kevadised mõõtetulemused

Kevadise lekkeperioodi ajal mõõdetud suhtelised õhuniiskused ja temperatuurid on toodud joonistel Joonis 52 ... Joonis 57. Kevadisel perioodil seina süstitud veelekked kogus oli kokku 10ml. Kumulatiivne graafik süstitud veelekkedest on toodud Joonis 51. Ristkihtliimpuidu ja soojustuse vahelises kihis jäi suhteline õhuniiskus vahemikku 40% - 50% ning temperatuurid ligikaudu 13°C – 18°C. Suhteliste õhuniiskuste Joonis 52 on näha, kuidas niiskustase jääb selgelt alla kriitilise piiri ning antud perioodil imiteeritud veelekked nähtavat mõju seina niiskusrežiimile ei omanud.

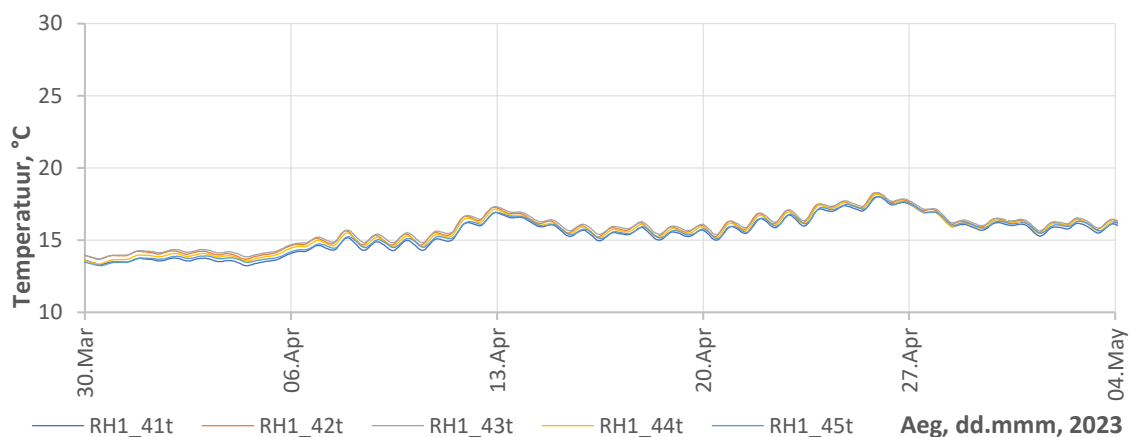
Mida saab tähele panna on juhud, kus on toimunud paar kraadi temperatuuri tõus ning seejuures on tõusnud ka suhteline õhuniiskus. Stabiilsemalt püsisid näitajad seinalõikudel 44 ja 45. Kuna lõikudel 44 ja 45 oli paigaldatud soojustuse ja puitpaneeli vahele ka ilmastikukaitsekanga kiht ning andurid positsioonil 1 jäid kanga ja puitpaneeli vahele on erisused mõistetavad.



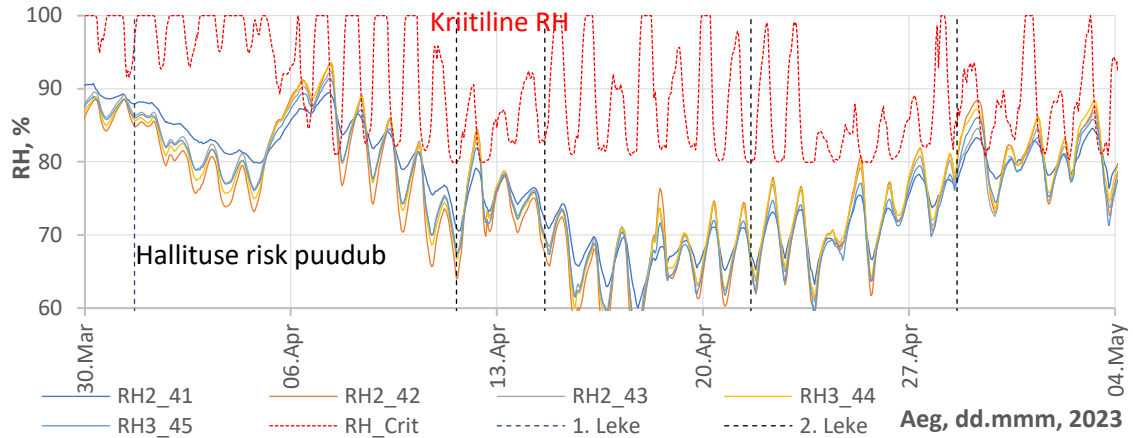
Joonis 51. Kevadise mõõteperioodi jooksul seinalõikudesse süstitud kumulatiivne veelekke graafik.



Joonis 52. Kevadise mõõteperioodi jooksul registreeritud suhteline õhuniiskus soojustuse ja puidu vahelises kihis seinalõikudel 41-45.

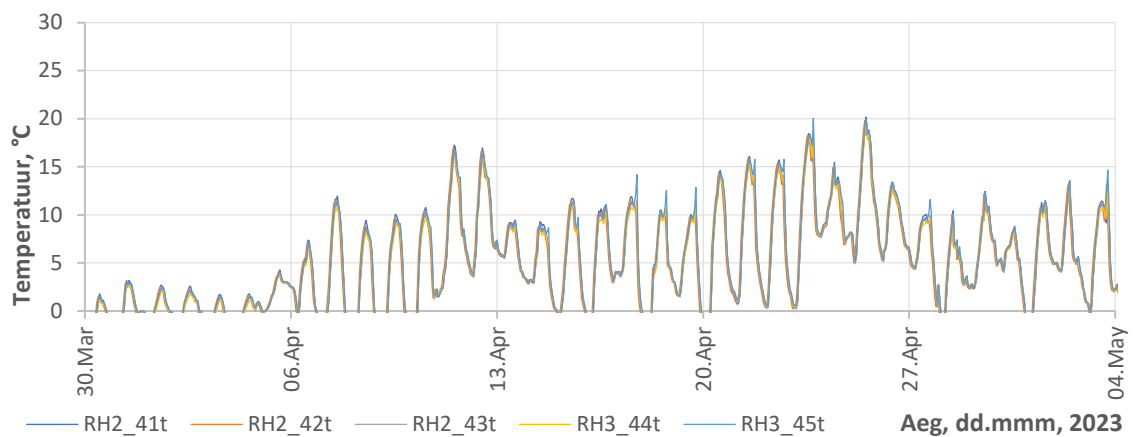


Joonis 53. Kevadise mõõteperioodi jooksul registreeritud temperatuurid soojustuse ja puidu vahelises kihis seinalõikudel 41-45.

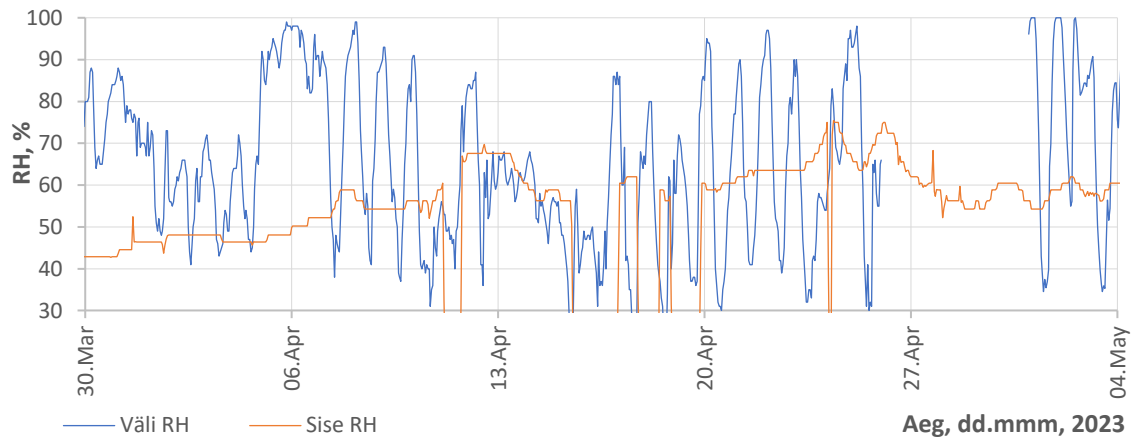


Joonis 54. Kevadise mõõteperioodi jooksul registreeritud suhteline õhuniiskus soojustuse ja krohvi vahelises kihis seinalõikduel 41-45.

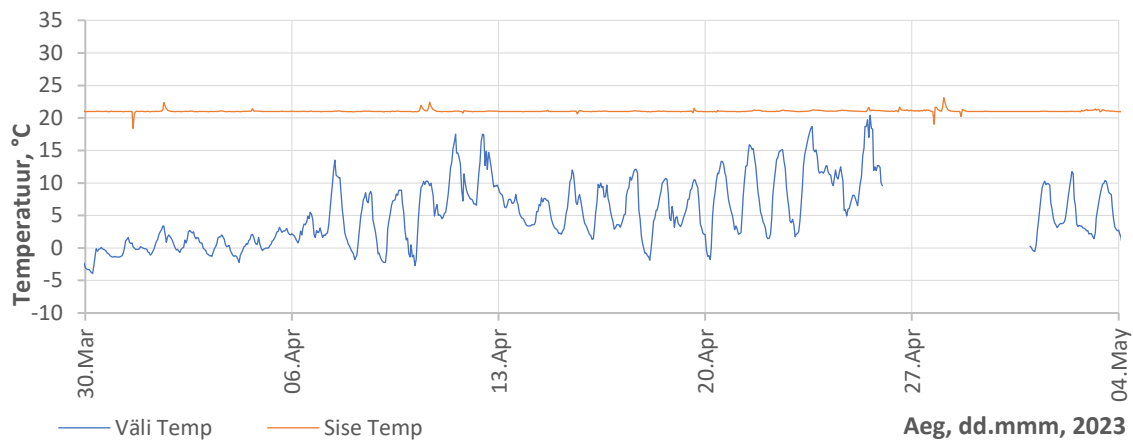
Krohvi taguses kihis jäid kevadisel mõõteperioodil suhtelised õhuniiskused vahemikku 60% - 90%, temperatuur muutus vahemikus 0°C - 18°C. Kui võrrelda Joonis 54 seinalõike 42 ja 44, kus vett krohvi taha süstiti, suhtelist õhuniiskust teiste seinalõikude õhuniiskustega on näha, et ka selles mõõtepunktis veeleke nähtavat mõju ei omanud. Vastupidiselt eeldatavale niiskustaseme kasvule hakkas see lekke ajal hoopis kahanema, see kirjeldab hästi kui suurt mõju omab seina niiskusrežiimile väliskliima.



Joonis 55. Kevadise mõõteperioodi jooksul registreeritud temperatuurid soojustuse ja krohvi vahelises kihis seinalõikduel 41-45.



Joonis 56. Kevadise mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima suhteline õhuniiskus.

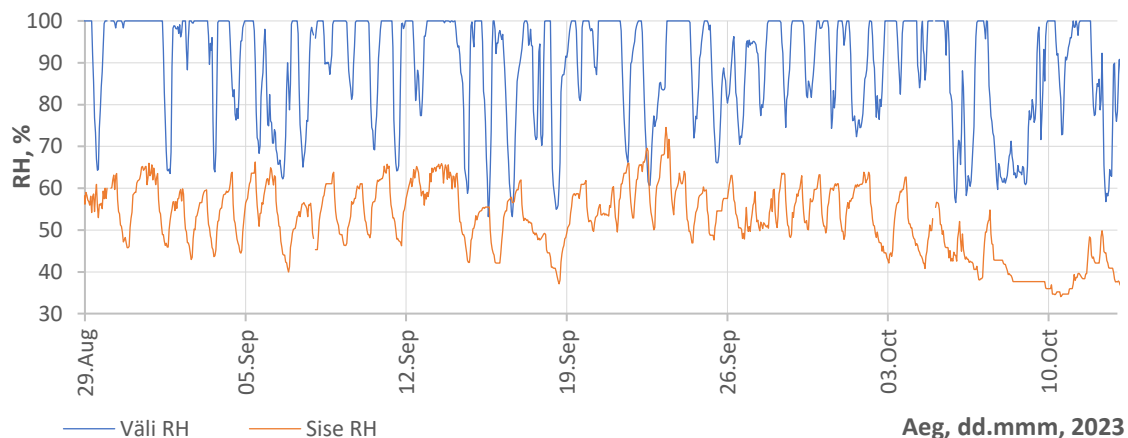


Joonis 57. Kevadise mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima temperatuur.

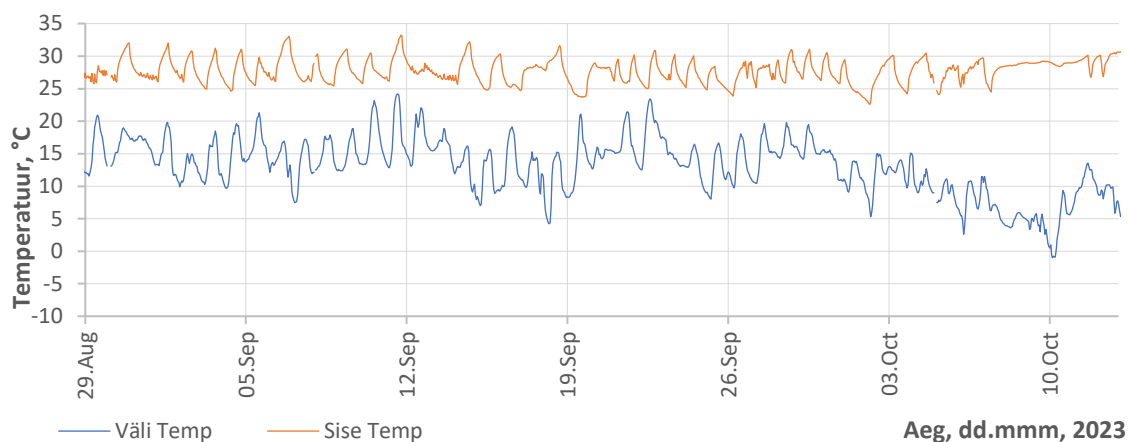
3.3 Testseintes suhtelise õhuniiskuste ja temperatuuride sügisesed mõõtetulemused

Sügisel imiteeritud veelekkete jooksul mõõdetud suhteliste õhuniiskuste ning temperatuuride andmed soojustuse ja puitpaneeli vahelises kihis on toodud Joonis 61 Joonis 62. Samaaegsed sise- ning väliskliima temperatuurid ning suhtelised õhuniiskused on toodud Joonis 58 ja Joonis 59. Sügisel imiteeritud veelekkete kogus oli märgatavalt suurem kui kevadel, kokku 840ml. Süstitud veelekkete kumulatiivne graafik

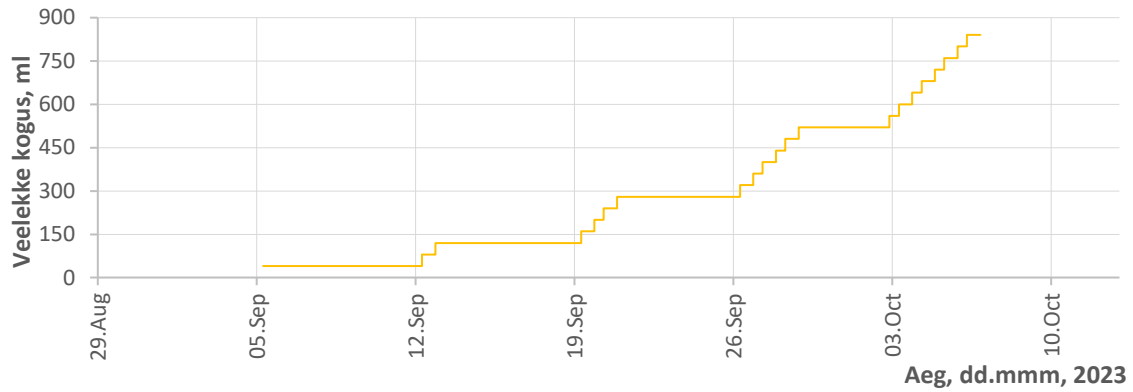
on toodud Joonis 60. Ristkihtliimpuidu ning villa vahel jäi suhteline õhuniiskus vahemikku 50% - 60%, temperatuur vahemikku 20°C - 25°C. Sisekliima suhteline õhuniiskus oli vahemikus 40% - 70%, temperatuur 25°C - 33°C. Väliskliima suhteline õhuniiskus vahemikus 60% - 100%, välitemperatuur 0°C - 23°C, Joonis 58Joonis 59.



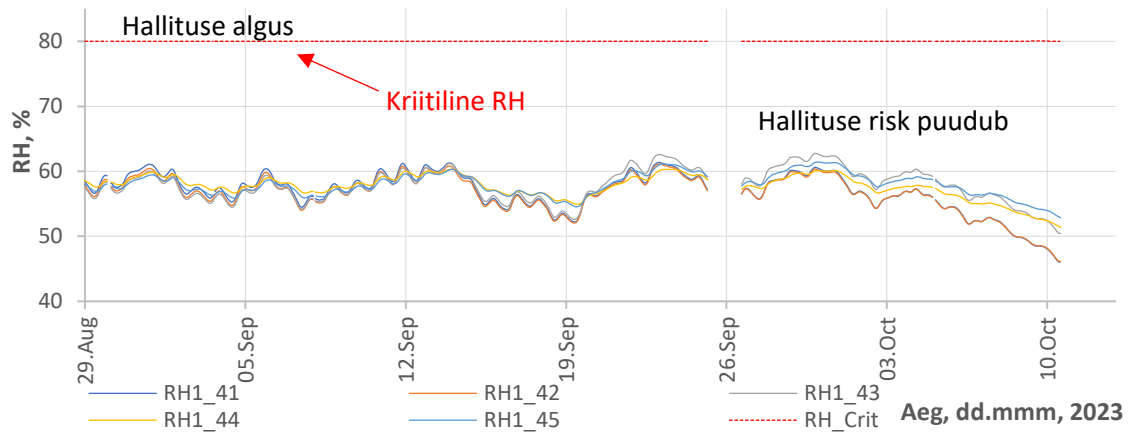
Joonis 58. Sügisese mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima suhteline õhuniiskus.



Joonis 59. Sügisese mõõteperioodi jooksul registreeritud väli- ning sisekliima temperatuurid.

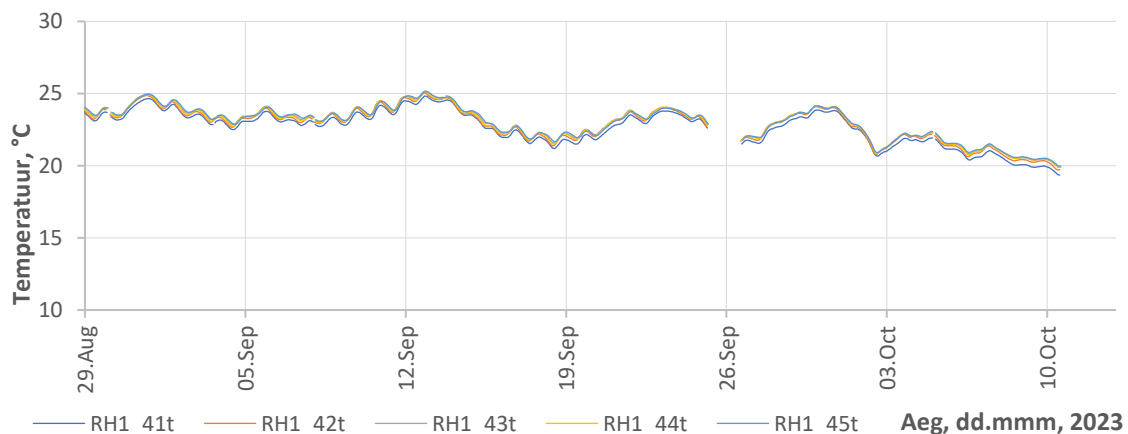


Joonis 60. Sügise mõõteperioodi jooksul seinalõikudesse süstitud kumulatiivne veelekke graafik.

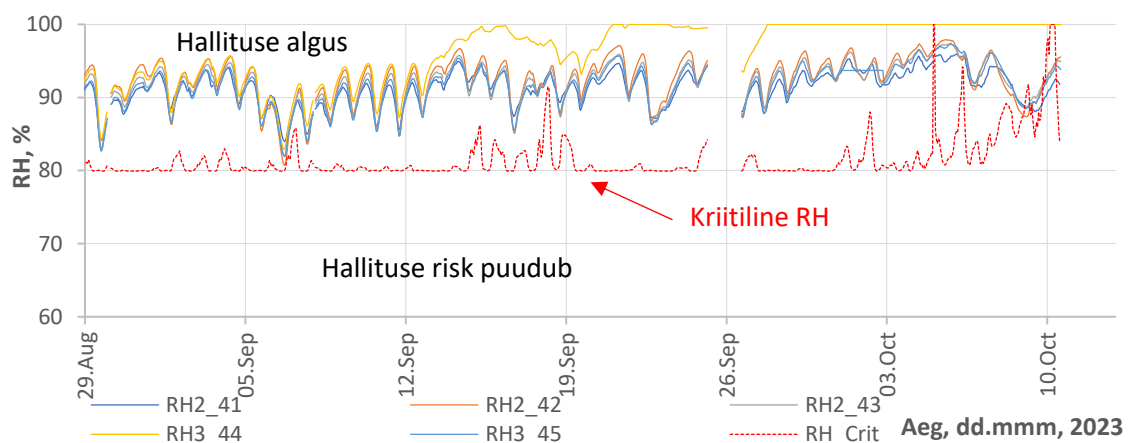


Joonis 61. Sügise mõõteperioodi jooksul registreeritud suhteline õhuniiskus soojustuse ja puidu vahelises kihis seinalõikudel 41-45.

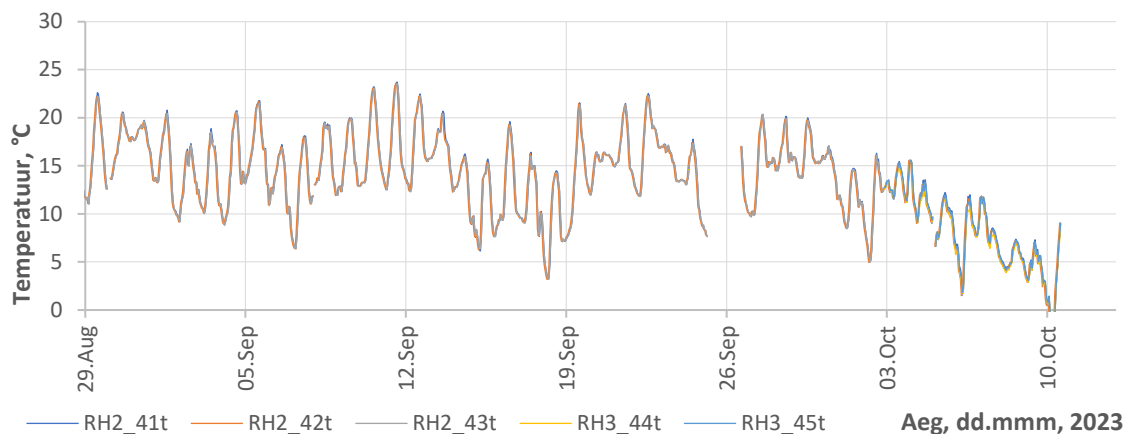
Kui võrrelda omavahel seinalõike Joonis 61, ei saa puidu ja villa vahelises kihis täheldada nähtavaid erisusi. Hoolimata suurest veelekke kogusest ei omanud seinalõigud 43 ja 45, kus vett puidupaneeli ning villa vahele süstiti, võrreldes teiste seinalõikudega suhtelise õhuniiskuse poolest suurt erinevust. Ka sügisesel perioodil kui veeleke oli väga suur jäi puidu ja villa vahelises kihis suhtelise õhuniiskuse protsent alla kriitilise piiri, mistõttu ei esinenud ohtu ka hallituse tekkele.



Joonis 62. Sügisese mõõteperioodi jooksul registreeritud temperatuurid soojustuse ja puidu vahelises kihis seinalõikudel 41-45.



Joonis 63. Sügisese mõõteperioodi jooksul registreeritud suhteline õhuniiskus soojustuse ja krohvi vahelises kihis seinalõikudel 41-45.

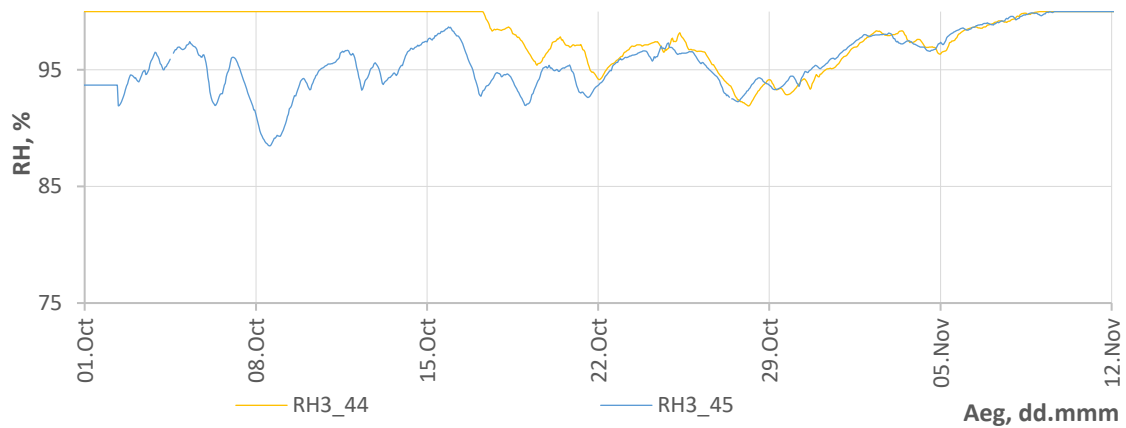


Joonis 64. Sügisese mõõteperioodi jooksul registreeritud temperatuurid soojustuse ja krohvi vahelises kihis seinalõikudel 41-45.

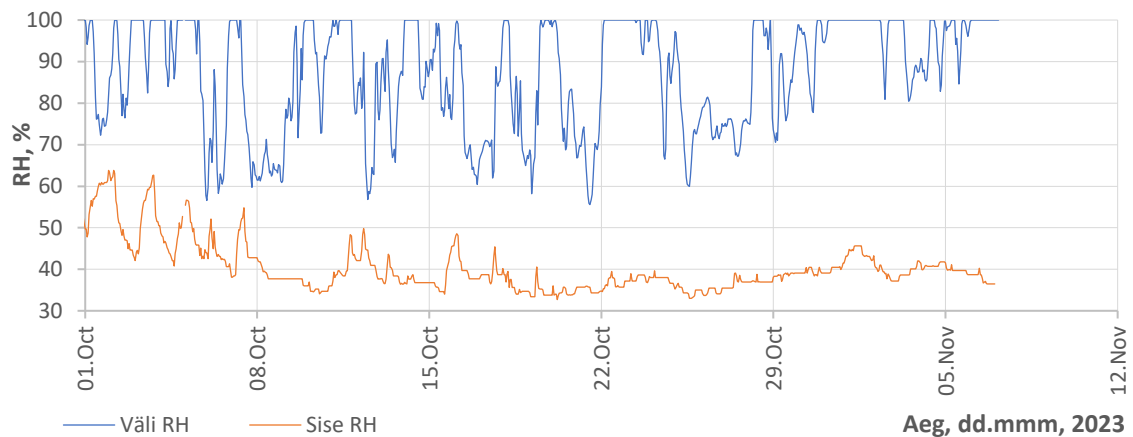
Krohvi taguses kihis jäid uuritud seinalõikudel suhtelised õhuniiskused vahemikku 80% - 100%, temperatuurid 5°C - 22°C, Joonis 63, Joonis 64. On näha, et väärtused ületavad seina niiskustehnilise toimivuse poolest kriitilist piiri, kuid seinalõigul 42 puuduvad selgelt eristatavaid väärtused, mis võiksid olla vastavuses imiteeritud lekkega. Lõigul 44 on hästi näha, kuidas lekke jooksul tõuseb kihis õhuniiskus isegi kuni 100% peale. Seinalõigul 44 krohvi tagust kõrget õhuniiskust oli näha ka visuaalse kontrolli käigus, Joonis 65.



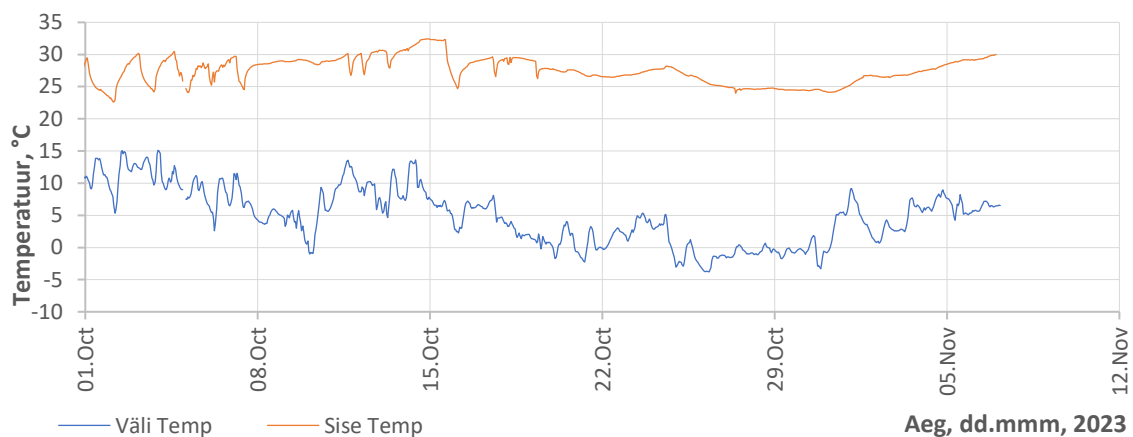
Joonis 65. Seinalõigul 44 sügisese katseperioodi lõpus veega küllastunud krohvikihit.



Joonis 66. Sügisese veelekk järgne krohvi välja kuivamine.



Joonis 67. Sügisese veelekk järgne väli- ning sisekliima suhteline õhuniiskus.



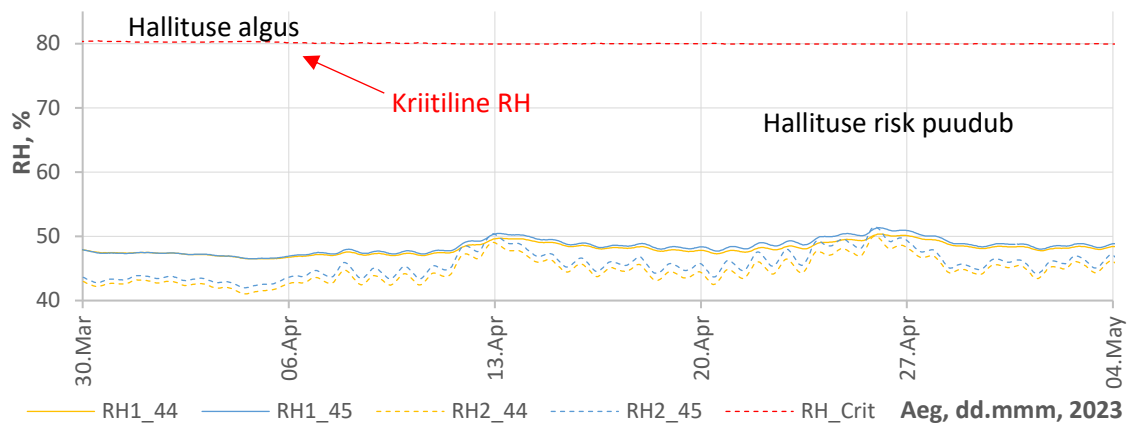
Joonis 68. Sügisese veelekk järgsed väli- ning sisekliima temperatuurid.

Sügisese veelekk järgselt on Joonis 66 hästi näha krohvi väljakuivamist. Jooniselt on näha, et peale sügisese veelekk lõppu alates 6.oktoober jääb suhteline õhuniiskus seinälõigul 44 veel ligikaudu kümneks päevaks 100% juurde ning seejärel langeb

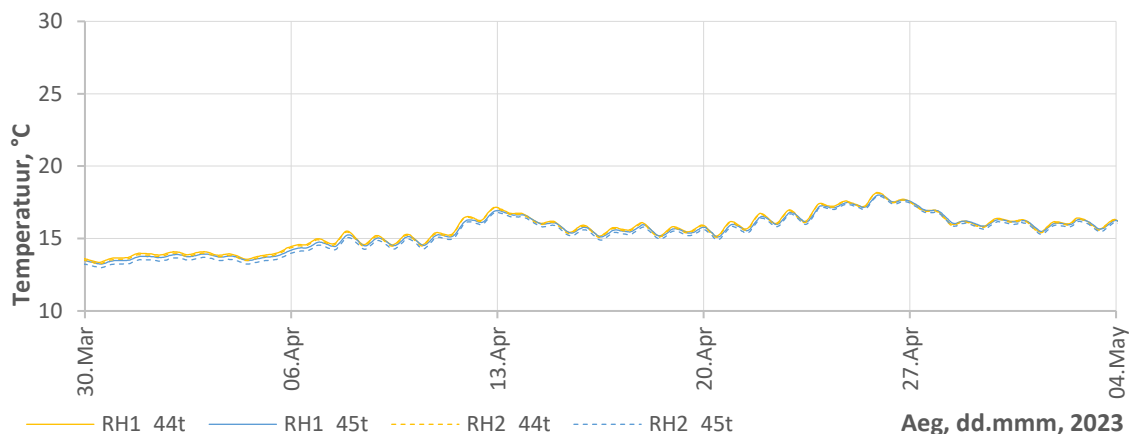
samale suhtelise õhuniiskuse tasemele nagu on seda seinalõigul 45. Joonis 66 näitab krohvikihi head väljakuivamise võimekust.

3.4 Kevadised ja sügised suhtelised õhuniiskused ja temperatuurid lõikudel 44 ja 45 ees- ja tagapool ilmastikukaitsekanga kihti

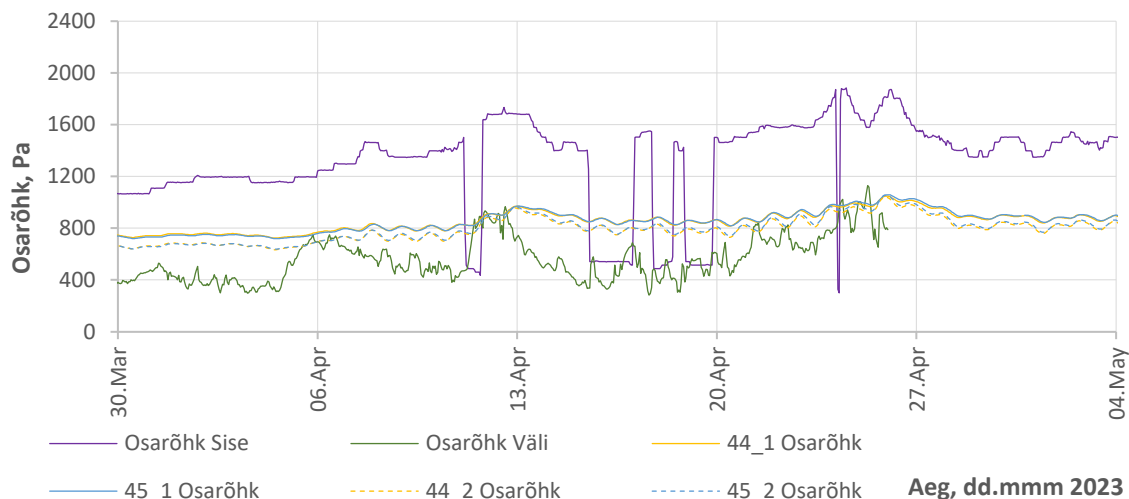
Kevadisel mõõteperioodil registreeritud suhtelised õhuniiskused ja temperatuurid nii ees- kui ka tagapool ilmastikukaitsekanga kihti seinalõikudel 44 ja 45 on toodud joonistel Joonis 69 Joonis 70. Joonistelt on näha, kuidas suhtelised õhuniiskused kanga ja puidupaneeli vahel jäid veidi kõrgemaks kui kanga ja soojustuse vahel. Puidu ja kanga vahelises kihis jäi suhteliseks õhuniiskuseks ligikaudu 48%, taga pool kangast ligikaudu 45%. Registreeritud temperatuurid jäid mõlemal positsioonil võrdselt vahemikku 14°C kuni 17°C. Märkatud erinevustele suhteliste õhuniiskuste osas ilmastikukaitsekanga ääres võiks tuua loogiliseks seletuseks selle, et soojustusmaterjal on niiskusele kordades vastuvõtlikum kui ristkihtpuitpaneel.



Joonis 69. Kevadise mõõteperioodi jooksul seinalõikudel 44 ja 45 suhtelised õhuniiskused ees- ja tagapool õhutõkke membraani.

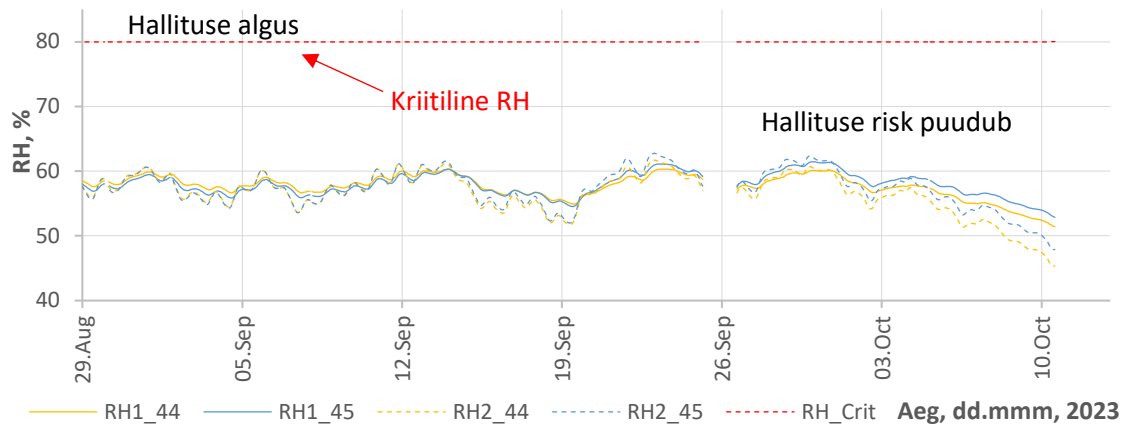


Joonis 70. Kevadise mõõteperioodi jooksul temperatuurid seinalõikudel 44 ja 45 ees- ja tagapool õhutõkke membraani.

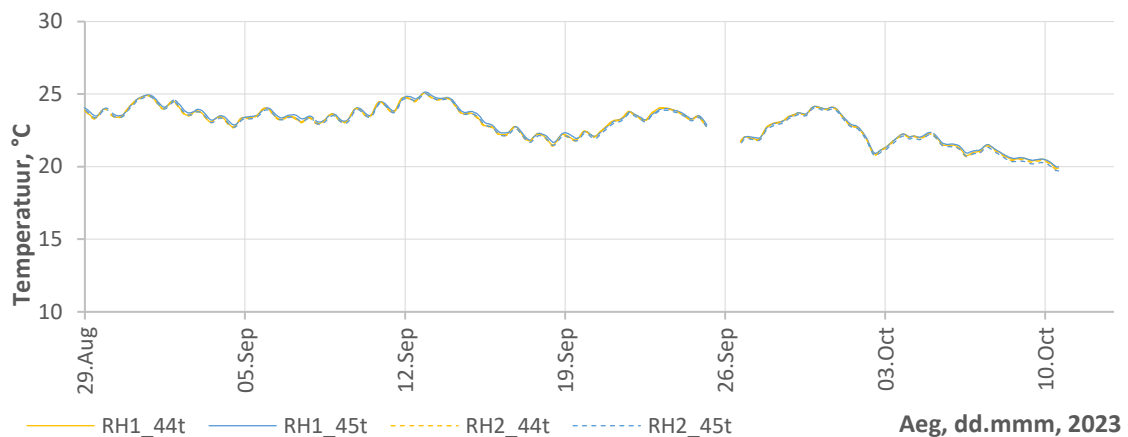


Joonis 71. Kevadise mõõteperioodi jooksul registreeritud veeauru osarõhud seinalõikudel 44 ja 45, ees- ja tagapool õhutõkke membraani.

Sügisese mõõteperioodil registreeritud suhtelised õhuniiskused ja temperatuurid nii ees- kui ka tagapool ilmastikukaitsekanga kihti seinalõikudel 44 ja 45 on toodud joonistel Joonis 72 Joonis 73. Joonistelt on näha, kuidas suhtelised õhuniiskused kanga ja puidupaneeli vahel jäid kanga ja soojustuse vaheliste väärtustega väga sarnaseks. Nii puidu ja kanga vahelises kihis kui ka kanga ja soojustuse vahelises kihis kõikusid suhtelised õhuniiskused 55% kuni 60% vahemikus. Registreeritud temperatuurid jäid mõlemal positsioonil võrdselt vahemikku 20°C kuni 25°C.

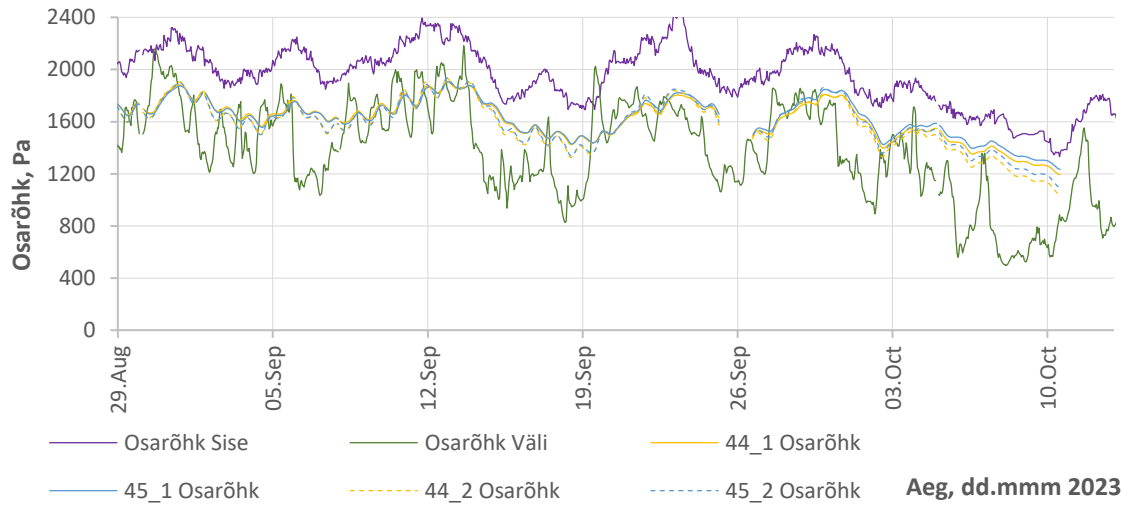


Joonis 72. Sügisese mõõteperioodi jooksul seinalõikudel 44 ja 45 suhtelised õhuniiskused ees- ja tagapool õhutõkke membraani.



Joonis 73. Sügisese mõõteperioodi jooksul registreeritud temperatuurid seinalõikudel 44 ja 45, ees- ja tagapool õhutõkke membraani.

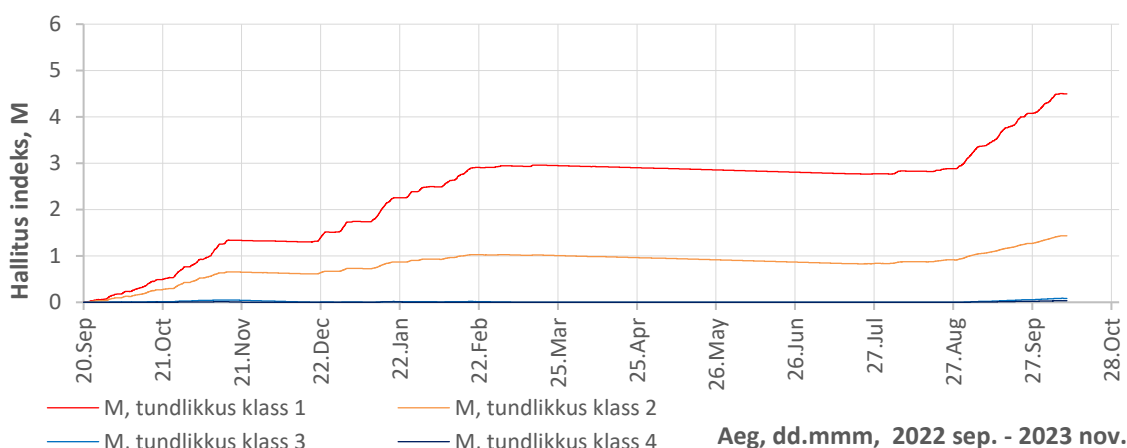
Kui eelduste kohaselt oodati 840ml suuruse lekke tõttu seinalõigult 45 väga kõrgeid suhtelisi õhuniiskusi, siis nagu Joonis 72 näha neid ei saavutatud. Selle tõenäoliseks põhjuseks võiks pidada veelekke raskusjõu mõjul liikumist tarindis paigaldatud anduritest sedavõrd palju eemale, mistõttu ka andmetes veelekke mõju ei kajastunud.



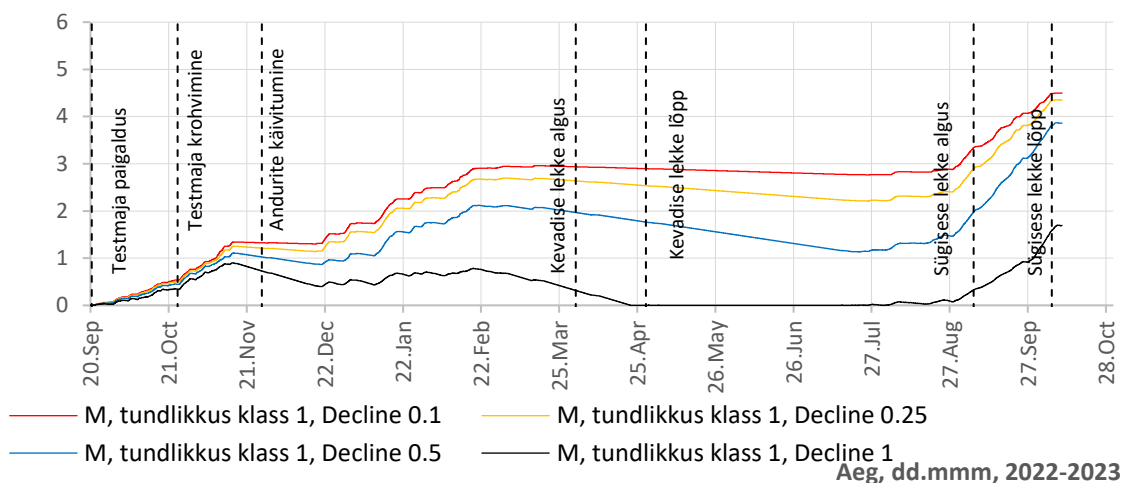
Joonis 74. Sügise mõõteperioodi jooksul registreeritud veeauru osarõhud seinaliikudel 44 ja 45, ees- ja tagapool õhutõkke membraani.

3.5 Testseinte hallitusindeksid

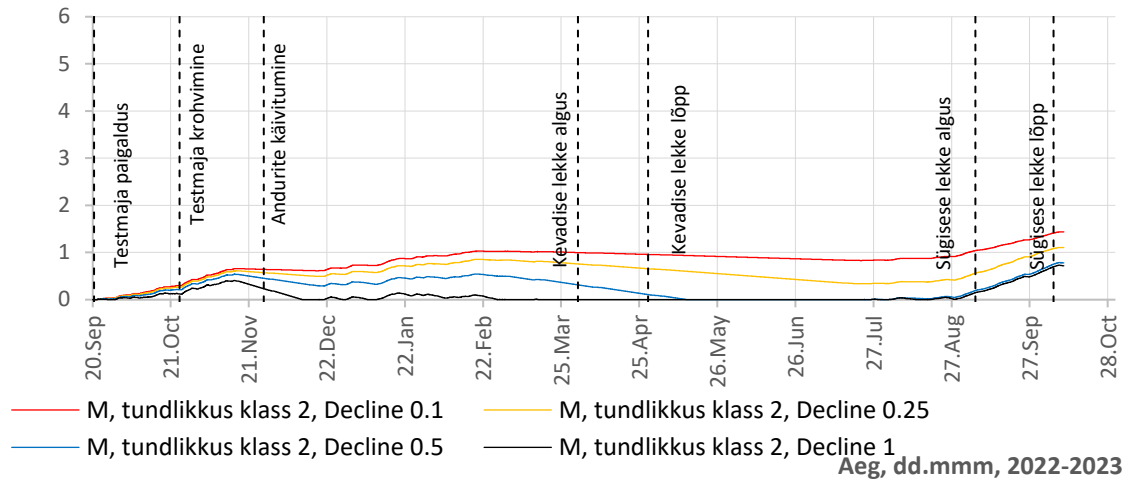
Joonistel Joonis 75, Joonis 78, Joonis 81, Joonis 82 ja Joonis 83 on näidatud hallitusindeksi arvutustulemused Viitaneni hallitusmudeli (Viitanen et al., 2011) järgselt kõikidele seinalõikudele krohvi ja soojustuse vahelises kihis. Algsed tulemused arvutati kõikidele lõikudele iga tundlikkusklassi 1-4 järgi hallituse kahanemisteguriga 0,1. Tehtud arvutuse järgi saavutasid kõik seinalõigud, kasutades materjali tundlikkusklassi 1 ja 2, krohvi taguses kihis hallitusindeksi väärtusega 1, mille korral oleks reaalne oht hallituse tekkeks olemas.



Joonis 75. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvutatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassidega 1-4 ning hallituse kahanemisteguriga 0.1. Seinalõigul 41, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.

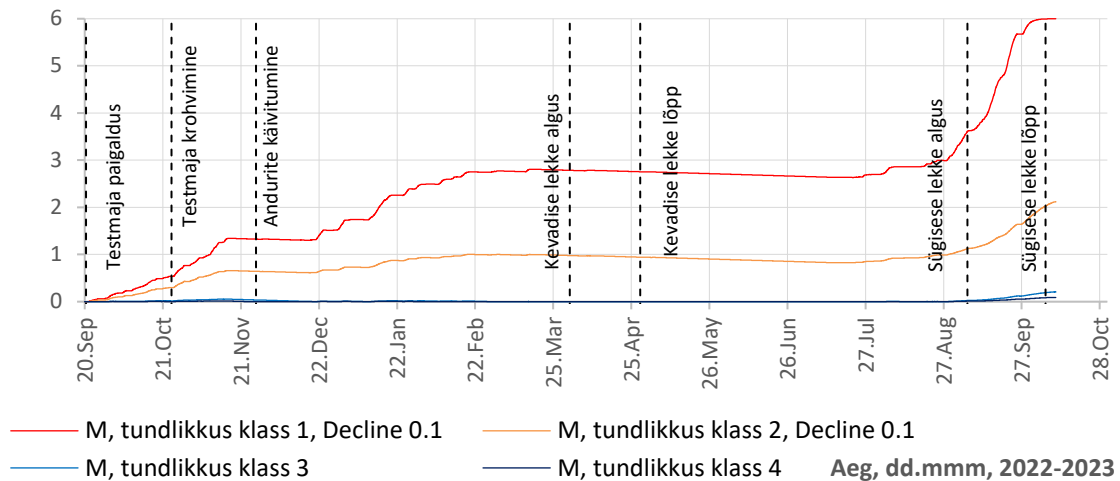


Joonis 76. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvutatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassiga 1 ning hallituse kahanemisteguritega 0.1 - 1. Seinalõigul 41, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.

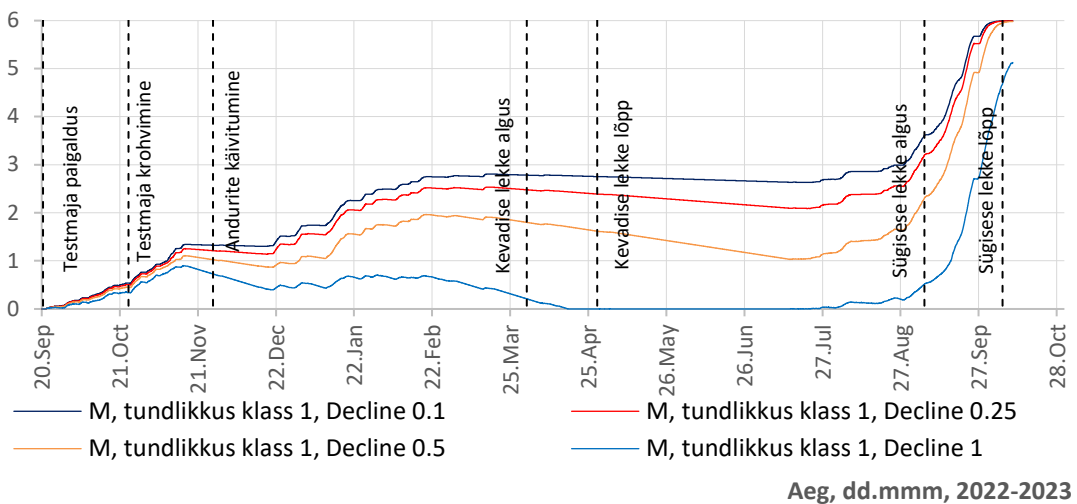


Joonis 77. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassiga 2 ning hallituse kahanemisteguritega 0.1 - 1. Seinalõigul 41, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.

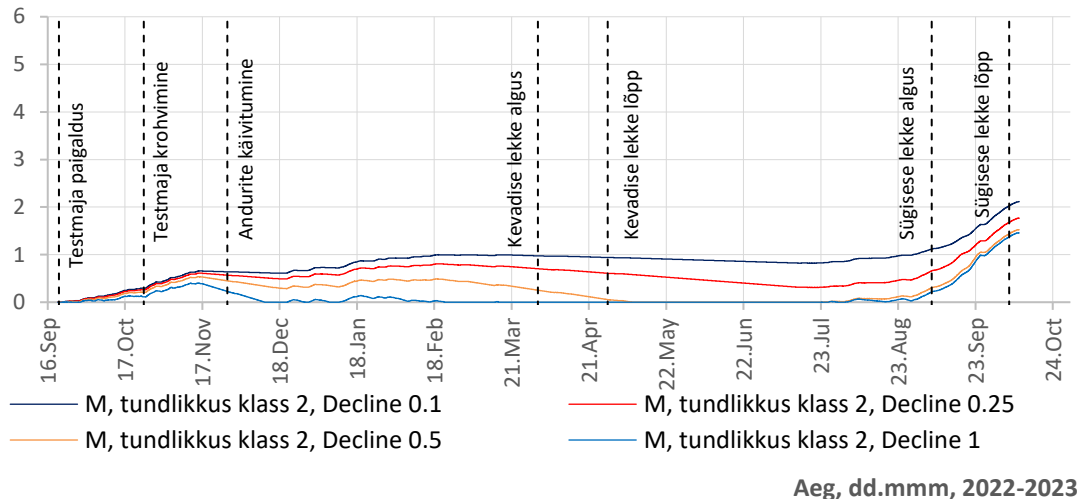
Tekitatud veelekkede mõjude täpsemaks analüüsiks võrreldi veelkord eraldi kõige kriitilisemat seinalõiku 44 ja ilma lekketa referentslõiku 41. Lõikudele arvutati hallitusindeksid kasutades materjali tundlikkuseklasse 1 ja 2 ning lisaks võeti arvesse ka erinevaid hallituse kahanemise tegureid 0.1, 0.25, 0.5 ja 1. Joonis 76 Joonis 77 pealt on selgelt näha hallitusindeksite tugevat kasvu sügise saabumisega. Kuna sügisel korraldati testmajas ka teine veelekkede võiks hallitusindeksite kasvu sellest tulenevaks pidada. Samas kui võrrelda seinalõike 41 ja 44 on näha, et indeksite kasv toimub mõlemal seinalõigul, mis taaskord iseloomustab veelekkede minimaalset mõju ning rõhub väliskliima osatähtsusele seina niiskusrežiimis. Kevadel ning suvel hallitusindeksid ei kasvanud. Olenevalt kahanemise teguri väärtustest hallitusindeksid kas stagneerusid või kahanesid.



Joonis 78. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassidega 1-4 ning hallituse kahanemisteguritega 0.1. Seinalõigul 44, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.



Joonis 79. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassiga 1 ning hallituse kahanemisteguritega 0.1-1. Seinalõigul 44, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.



Joonis 80. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassiga 2 ning hallituse kahanemisteguritega 0.1-1. Seinalõigul 44, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.

Joonistelt on hästi näha olukord, kuidas testmaja paigaldamise hetkest alates seinas hallitusindeks kasvab, ning hoiab oma väärtust läbi kevade kuniks sügisel hakkab indeksi väärtus uuesti kasvama. Seda juhul kui arvestada materjali hallituse kahanemisteguriks 0.1. Sedavõrd väikese kahanemisteguri korral võibki ohuks kujuneda lühikeste mõõteperioodide põhjal järelduste tegemine, mil hinnatakse hallitusrisk madalaks. Võttes arvesse selle, et hallitusindeks kevade ja suve jooksul sisuliselt ei taandu ning tulevikus järkjärgult kasvab, ei saa välistada võimalikke riske. Vaadates graafikult joont, mis kirjeldab hallitusindeksit kahanemisteguriga 1 on hästi näha, kuidas seinal on võimalik kevade ja suvega küllalt palju välja kuivada ning hallitusindeks jääb nulliks, mis elimineerib ohu kahjustustele.

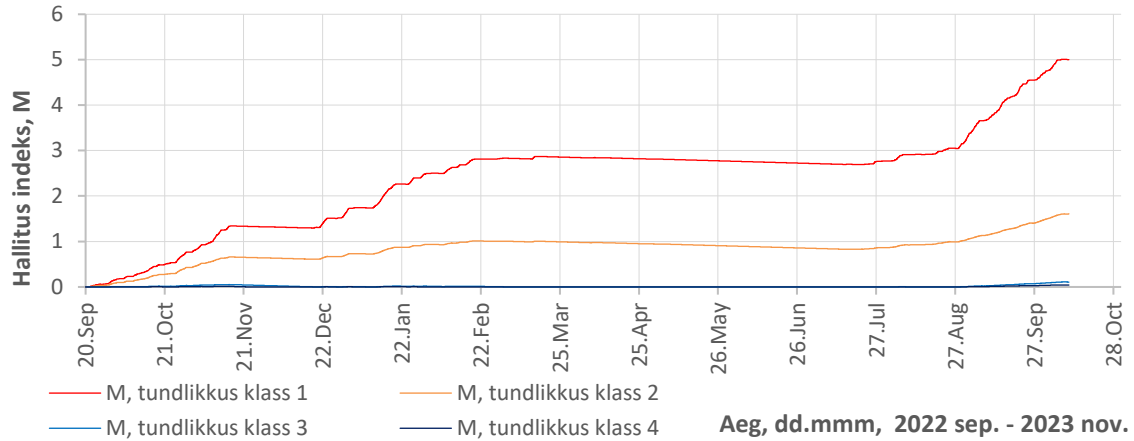
Kõige ohtlikuma olukorra saavutas krohvitaguse veelekkega seinalõik 44, kus arvestades materjali tundlikkuse klassiks 1 saavutas hallitusindeks sügisperioodi ajal väärtuse 6. Materjali tundlikkuse klassi 2 korral jäi väärtus veidi üle 2. Seinalõik 42, kuhu oli samuti tekitatud veeleke krohvi kihi taha, jäi hallitusindeks sügisperioodil väärtuse 5 juurde. Materjali tundlikkuse klassi 2 korral jäi väärtuseks 1.5.

Kui võrrelda hallitusindeksi tulemusi seinalõikudel 44 ja 41 on näha, kuidas lõigul 44, kus veeleket krohvi taga imiteeriti jäävad hallitusindeksid nähtavalt suuremaks kui lõigul 41. Materjali tundlikkuse klassi 1 korral pürgivad sügisperioodil hallitusindeksid lõigul 44 indeksi 6 poole. Seinalõigul 41 jäävad näitajad samal ajal indeksi 4 juurde. Tundlikkuse klassi 2 korral jääb indeks tunduvalt väiksemaks – lõigul 44 jäävad sügisperioodil väärtused 1 ja 2 vahele, lõigul 41 jäävad indeksid 0.5-st 1.5-ni. Materjali

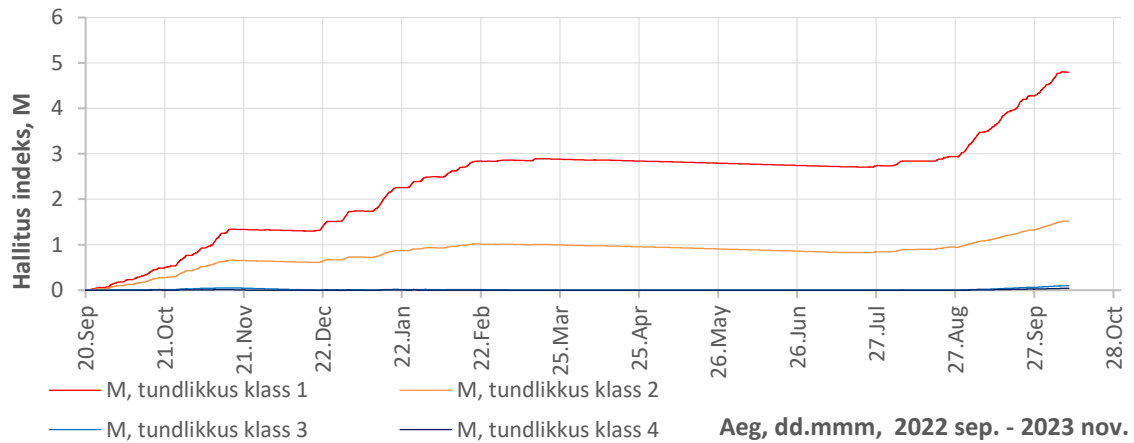
tundlikkuse klasside 3 ja 4 puhul ohtu hallitusele ei eksisteeri, seda isegi kõige väiksema kahanemisteguri 0.1 korral.

Antud uurimistöös katsetatud puitkiudvillast soojusisolatsioonimaterjalil tundlikkuse klassi ja hallituse kahanemistegurit deklareeritud ei ole. Kuna soojustusmaterjali tootelehel on kirjas, et see sisaldab ka polüuretaanvaiku ja parafiini, võib oletada, et materjal liigitub tundlikkuse klassi 3. Nagu eelnevalt ka mainitud, siis sellisel juhul olenemata kahanemistegurist hallituse riski ei teki, seda nii referentsseinas 41 kui ka imiteeritud krohvitaguste veelekete korral lõikudes 42 ja 44. Kuid kuna sarnased soojusisolatsiooni materjalid võivad laialt varieeruda nii lisandite poolest kui ka tootmistehnoloogiate poolest, ei saa võtta seisukohta, et puitkiudvillast soojusisolatsiooni liitsüsteemi korral on sein niiskustehniliselt toimiv ning oht välistatud. Nagu ka (Tanaka et al., 2021) kirjeldas oma uurimuses, võib puitkiudvillast isolatsioonimaterjal olla mädaniku suhtes tavapuidust nii vastupidavam kui ka mitmetes kordades tundlikum, mistõttu on konkreetse hinnangu andmiseks alati vajalik välja selgitata täpsed materjali omadused.

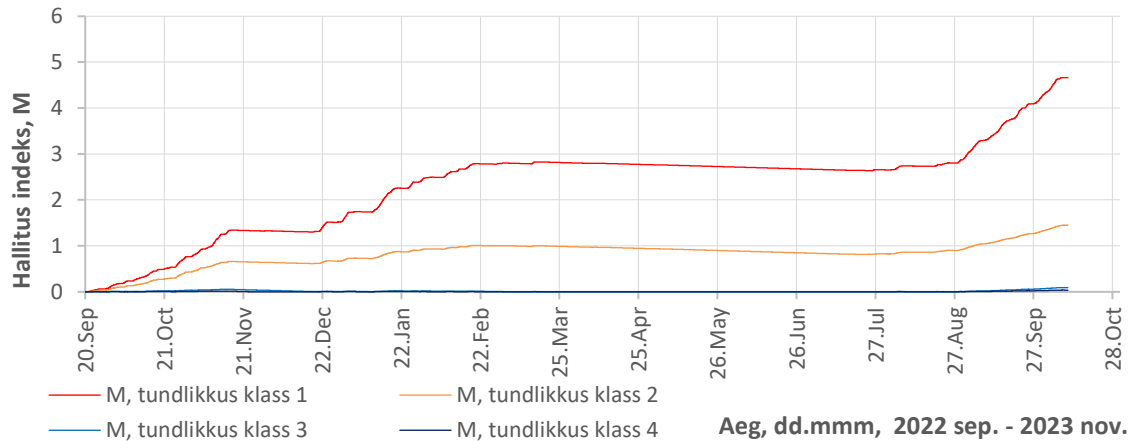
Hinnates imiteeritud veelekke mõju testseina hallitusindeksile ning võrreldes seda referents seinaga hallitusindeksitega on erinevused märgatavad. Materjali tundlikkuse klassi 1 korral veelekkega seinalõigul 44 hindab hallitusmudel, et kuni 50% materjali pinnast võib olla kaetud hallitusega. Referents seinal 41 samuti tundlikkuse klassi 1 korral hindab mudel, et kuni 10% materjali pinnast katab hallitus. Arvestades materjali tundlikkuseks klassi 2 hindab mudel seinalõigul 44, et materjali pinnal eksisteerivad mitmed mikroskoopilised lokaalsed hallituse kolooniad. Ilma lekketa referentslõigul 41 hindab mudel tundlikkuse klassi 2 puhul, et materjali pinnal esinevad esimesed mikroskoopilised hallitusalged.



Joonis 81. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassidega 1-4 ning hallituse kahanemisteguriga 0.1. Seinalõigul 42, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.



Joonis 82. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassidega 1-4 ning hallituse kahanemisteguriga 0.1. Seinalõigul 43, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.

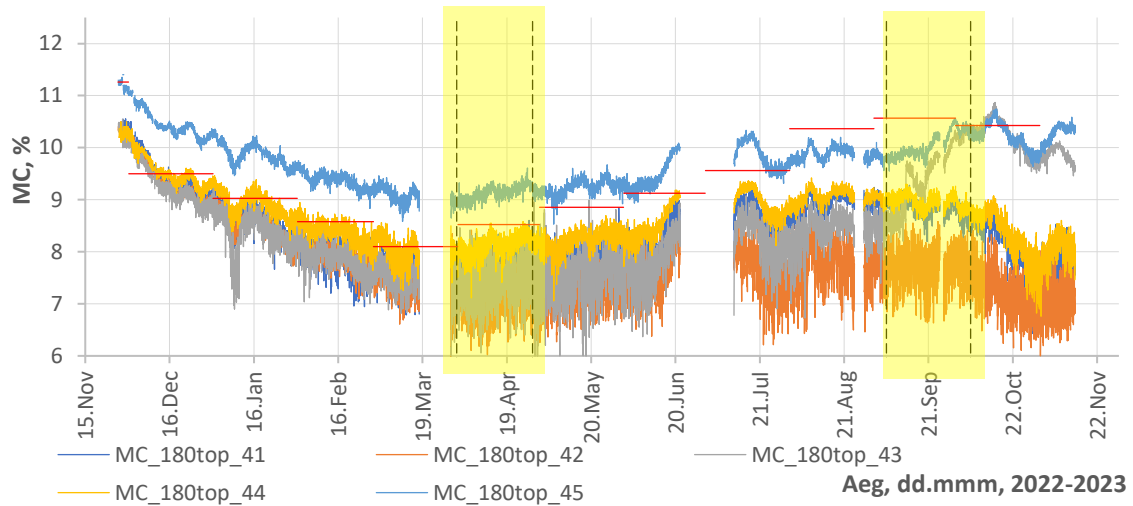


Joonis 83. Viitaneni hallitusmudeli järgi arvatud hallitusindeksid materjali tundlikkuse klassidega 1-4 ning hallituse kahanemisteguriga 0.1. Seinalõigul 45, krohvi ja soojustuse vahelises kihis.

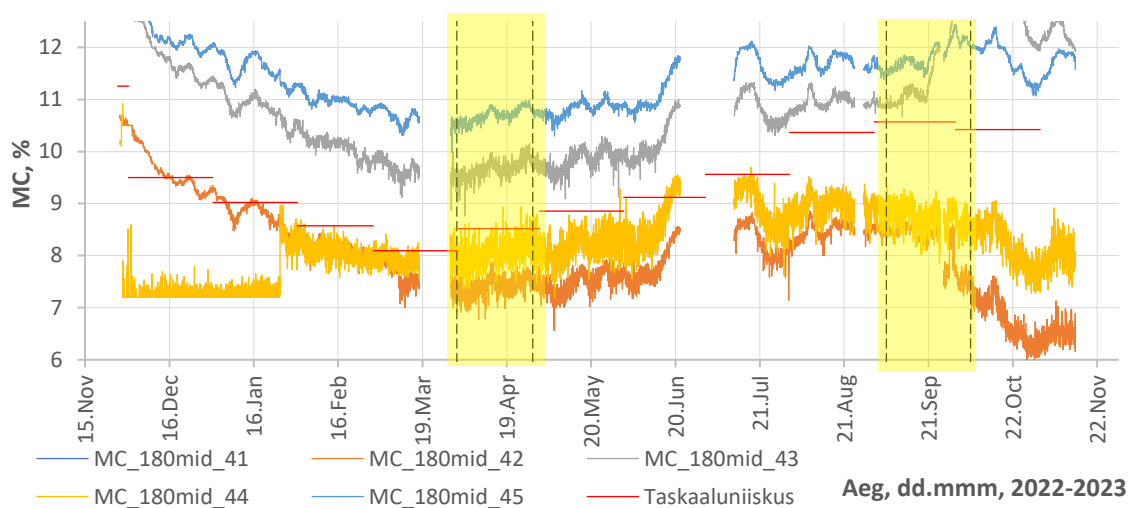
3.6 Puidu mõõdetud niiskussisaldused

Niiskussisaldust testseina ristkihtliimpuidust paneelis mõõdeti perioodil 27.11.2022 – 15.11.2023. Mõõdetud tulemused on kuvatud Joonis 84 -Joonis 89. Joonistel, mis kujutavad kogu mõõteperioodi jooksul registreeritud niiskussisaldusi on kollase tsooniga tähistatud ka kevadise ja sügise tekitatud veelekked ajavahemikud võrdlemaks lekkeperioodil esinevaid muutusi ülejäänud katseperioodiga. Seinalõigu 43 villa ja ristkihtliimpuidu vaheliste suhteliste niiskuste ning temperatuuri andmete põhjal arvutati kogu mõõteperioodile juurde ka tasakaaluniiskuse protsent, mis on kuvatud niiskussisalduste graafikutel punase horisontaalse joonena. Tasakaaluniiskuse arvutamiseks interpoleeriti (Simpson, 1991) puidu tasakaalu niiskussisalduse tabeli väärtusi.

Vaadates tulemusi puidu niiskussisalduste osas kogu mõõteperioodi jooksul on näha, kuidas tulemused varieeruvad seinalõikudel üsna palju ning puuduvad ka nähtavad muutused niiskussisalduses kevadise ja sügise lekkeperioodi jooksul. Joonistel on küll näha, kuidas puidu ja villa vahelises kihis tekitatud veelekkega seinalõigud 43 ja 45 on kõrgema niiskussisaldusega kui teised seinalõigud, kuid kuna taoline olukord kestis terve mõõteperioodi vältel ning testmaja seinalõigud olid võrdsete algniiskustega ei saa neid andmeid seostada veelekkega.

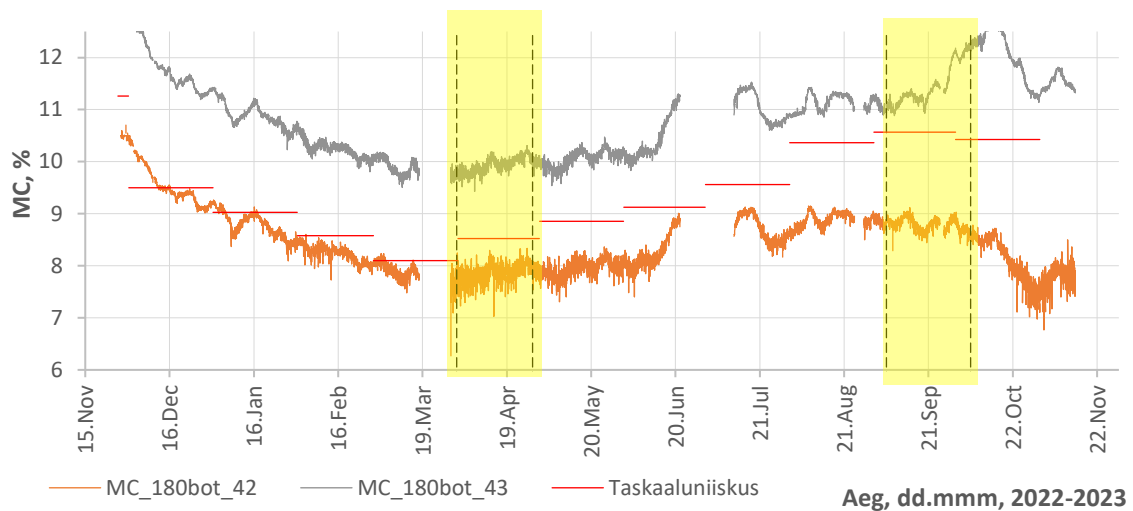


Joonis 84. Kogu mõõteperioodi vältel mõõdetud niiskussisaldused 180mm sügavusel puitpaneeli sisepinnast, positsioonil top seinalõikudel 41-45.

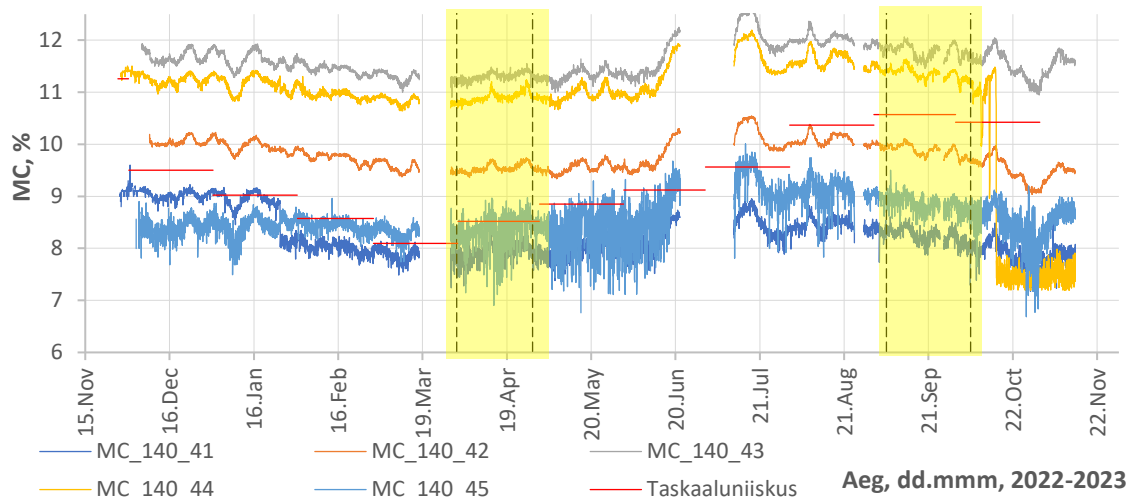


Joonis 85. Kogu mõõteperioodi vältel mõõdetud niiskussisaldused 180mm sügavusel puitpaneeli sisepinnast, positsioonil mid seinalõikudel 41-45.

Puidu niiskussisalduses muutuste puudumise üheks põhjuseks võiks oletada puitkiudvilla ja puidu väga erinevad veemavuse koefitsiente. (Lipand, 2021) on uurinud puidu veemavust, ning on saanud väärtuseks $0.0026 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^{0.5}} \right]$. Puitkiudvilla veemavuse koefitsiendiks on aga mõõdetud väärtus $0.0187 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^{0.5}} \right]$ (Products: STEICO, n.d.), mis on oluliselt suurem kui puidul ning seda saab ka pidada põhjuseks, miks vesi ei jõua villa ja puidu vahelises kihis puidu pinda imenduda.

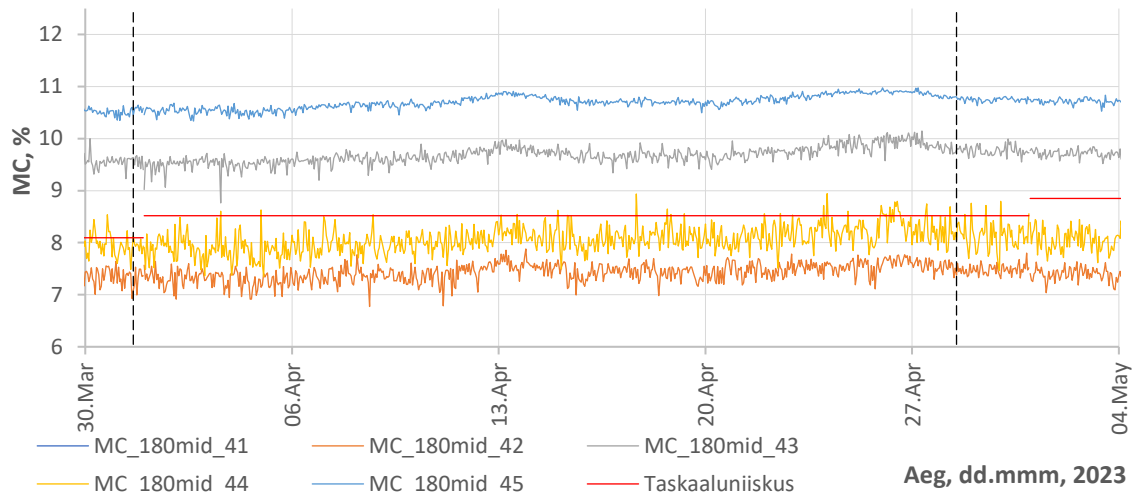


Joonis 86. Kogu mõõteperioodi vältel mõõdetud niiskussisaldused 180mm sügavusel puitpaneeli sisepinnast, positsioonil bot seinalõikudel 41-45.

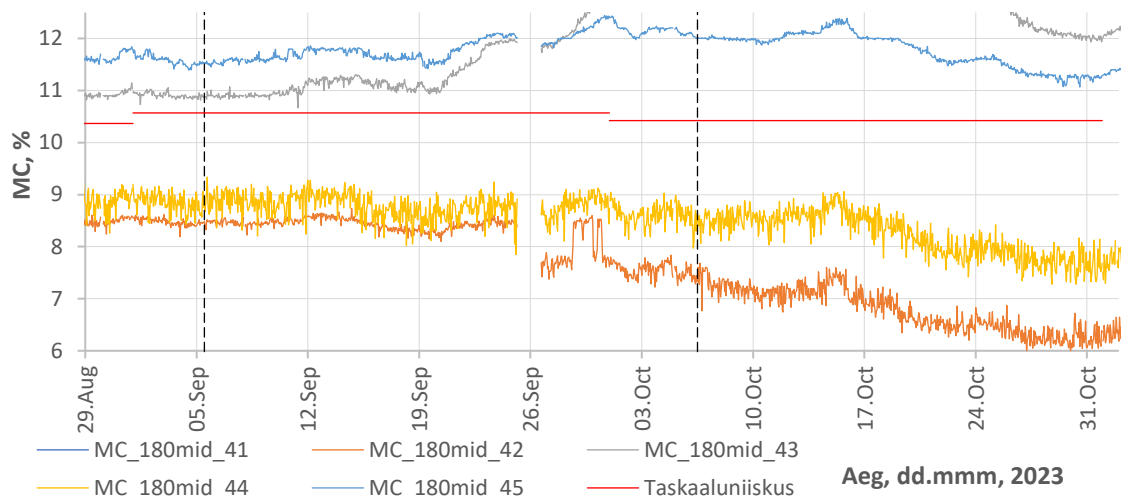


Joonis 87. Kogu mõõteperioodi vältel mõõdetud niiskussisaldused 140mm sügavusel puitpaneeli sisepinnast, seinalõikudel 41-45.

Joonis 88 ja Joonis 89 kirjeldavad kevadise ja sügise lekkeperioodi ajal puidupaneelist 180mm sügavusel puidu niiskussisaldusi ja nendes toimunud muudatusi. Joonis 88 näitab, et kevadisel katseperioodil puidu niiskussisaldustes sisuliselt muudatusi ei toimunud. On küll näha kuidas näitajad seinalõikudel 42 ja 44, kus imiteeriti leket krohvi taga mitte puidu ja soojustuse vahelises kihis, on madalamate niiskussisaldustega kui lõikudel 43 ja 45, kuid taolised näitajad olid ka enne lekkeperioodi seega ei saa sellest mingisuguseid järeldusi teha.



Joonis 88. Kevadise mõõteperioodi vältel mõõdetud niiskussisaldused 180mm sügavusel puitpaneeli sisepinnast, positsioonil mid seinalõikudel 41-45.



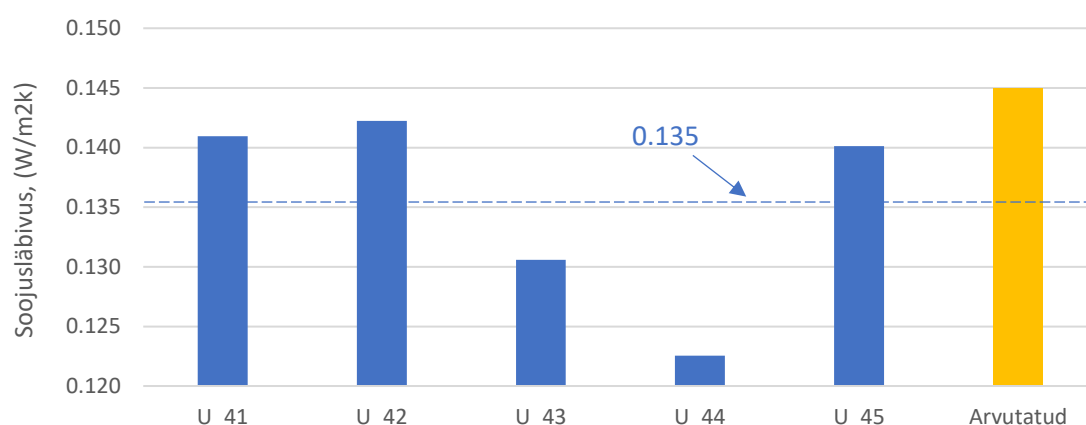
Joonis 89. Sügisese mõõteperioodi vältel mõõdetud niiskussisaldused 180mm sügavusel puitpaneeli sisepinnast, positsioonil mid seinalõikudel 41-45.

Puidu niiskussisalduse mõõtmiste andmete põhjal ei saa veelekkest põhjustatud puiduniiskuse sisalduse muutusi täheldada. Kuna identsete seinalõikude vahelised niiskussisalduse väärtused varieeruvad küllaltki palju ning ei oma loogilist seletust, võiks nähtavaid tulemusi pigem arvata mõõtemääramatuse hulka. Veel, mis võib mõõtemääramatust põhjustada on see, et kuna puidu niiskus on ikkagi võrdlemisi madal on raske elektroodkruvide meetodika abil täpset niiskussisaldust hinnata, sest antud meetod sobib paremini kõrgemate, alates 15% puiduniiskuste määramiseks.

3.7 Testseinte soojuslähivused

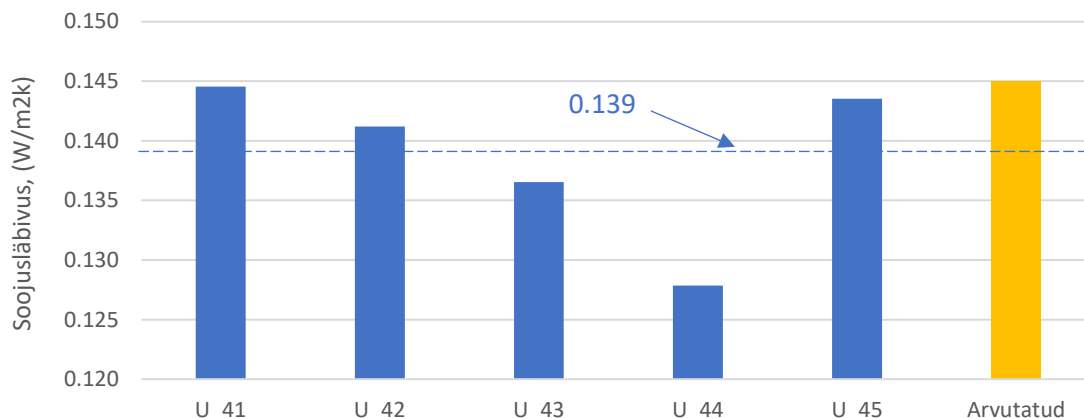
Testseinte soojusvoo mõõtmiste kaudu leitud soojuslähivused jäid ligikaudu samasse suurusjärku nagu seintele varasemalt arvatati. Mõõte tulemuste kaudu leitud soojuslähivused hajusid seinalõiguti kuni $0.02 \text{ (W/m}^2\text{k)}$. Tähelepanu püüab asjaolu, et mõõdetud väärtuste kõik keskmised väärtused olid arvatatud tulemusest väiksemad. Ligilähedasemad tulemused arvutustulemustele saadi kasutades õhutemperatuure, mitte testseinte pinnatemperatuure. Pinnatemperatuure kasutades jäi keskmine tulemus arvatust väiksemaks $0.01 \text{ (W/m}^2\text{k)}$, õhutemperatuuri järgsete arvutuste puhul jäi aga keskmine tulemus väiksemaks $0.006 \text{ (W/m}^2\text{k)}$. Kõige enam erinesid arvatust seinalõigud 43 ja 44, mis jäid juba märgatava suurusjärgu võrra arvatud väärtusest väiksemaks.

Joonis 90 kujutab seinalõikude 41-45 soojuslähivuste katsetulemuste keskmisi tulemusi võttes arvesse testseinte pinnatemperatuure. On näha kuidas arvutustulemus, keskmisega $0.135 \text{ (W/m}^2\text{k)}$ on kõigist katsetulemustest suurem, seda eriti seinalõikude 43 ja 44 puhul.



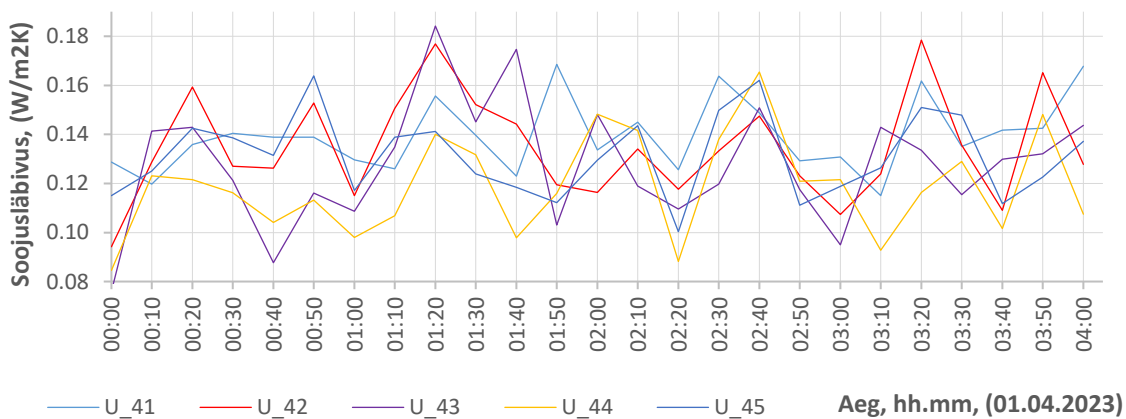
Joonis 90. Seinalõikude 41-45 mõõdetud keskmised soojuslähivused 1.-3. aprill öiste mõõtmiste põhjal ning eeldatud arvutusväärtus. Testseinte pinnatemperatuuride järgi leitud tulemused.

Joonis 91 kujutab seinalõikude 41-45 soojuslähivuste katsetulemuste keskmisi tulemusi võttes arvesse õhutemperatuure. On näha kuidas arvutustulemus, keskmisega $0.139 \text{ (W/m}^2\text{k)}$, on kõigist katsetulemustest jätkuvalt suurem, seda samuti seinalõikude 43 ja 44 puhul.

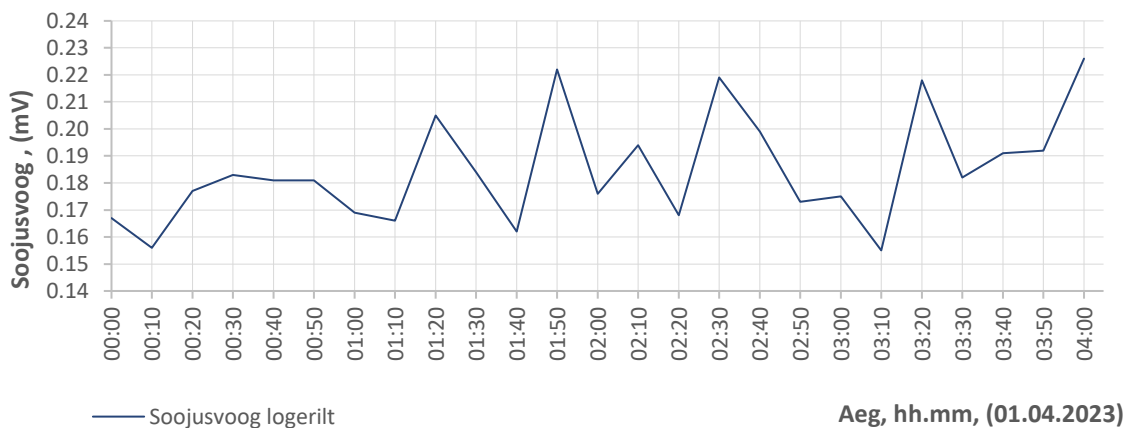


Joonis 91. Seinalõikude 41-45 mõõdetud keskmised soojusläbivused 1.-3. aprill öiste mõõtmiste põhjal ning eeldatud arvutusväärtus. Õhutemperatuuride järgi leitud tulemused.

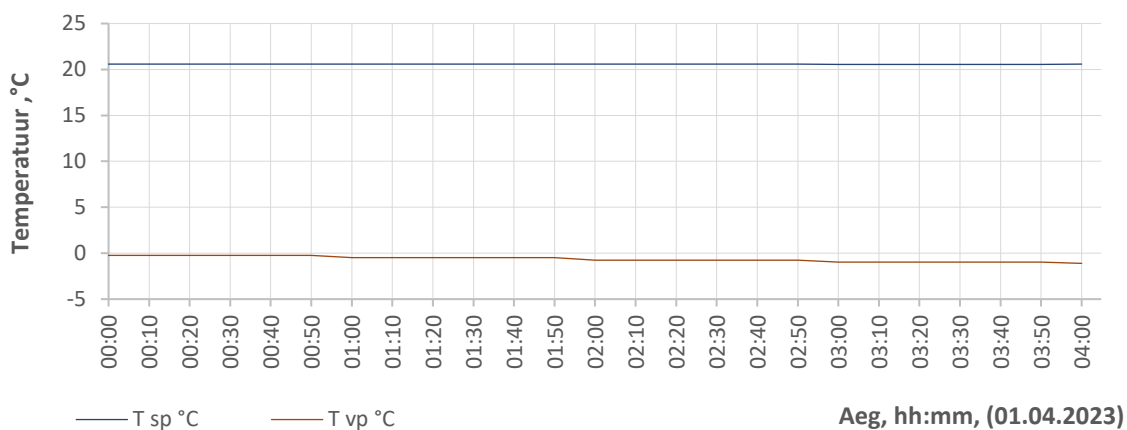
Joonis 92 on toodud arvutatud soojusläbivused 10-minutiliste intervallidega 1.aprill 2023 öiste katsetulemuste põhjal. Jooniselt on näha, kuidas kõikidel seinalõikudel mõõdetud tulemused erinevad öise mõõtmise käigus küllaltki palju, kohati isegi 40%. Nagu Joonis 94 näitab püsib sisetemperatuur terve öö jooksul stabiilselt 20°C ning välitemperatuur 0°C, kui aga pöörata tähelepanu soojusvoogudele on näha, et tulemused erinevad palju, isegi kuni 27%, millest on tingitud ka sedavõrd varieeruvad tulemused soojusläbivuste osas.



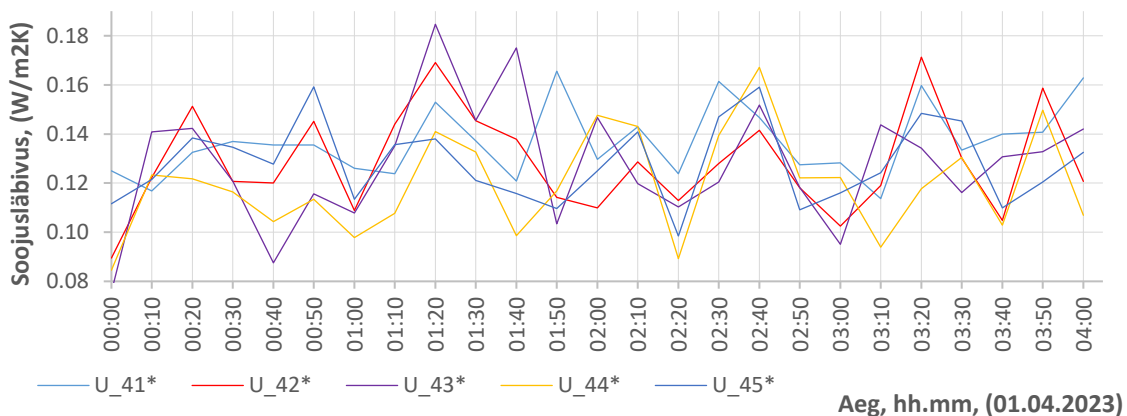
Joonis 92. Seinalõikude 41-45 arvutatud soojusläbivused pinnatemperatuure arvestades, 10-minutilise intervalliga ühe öö jooksul, 1.aprill 2023.



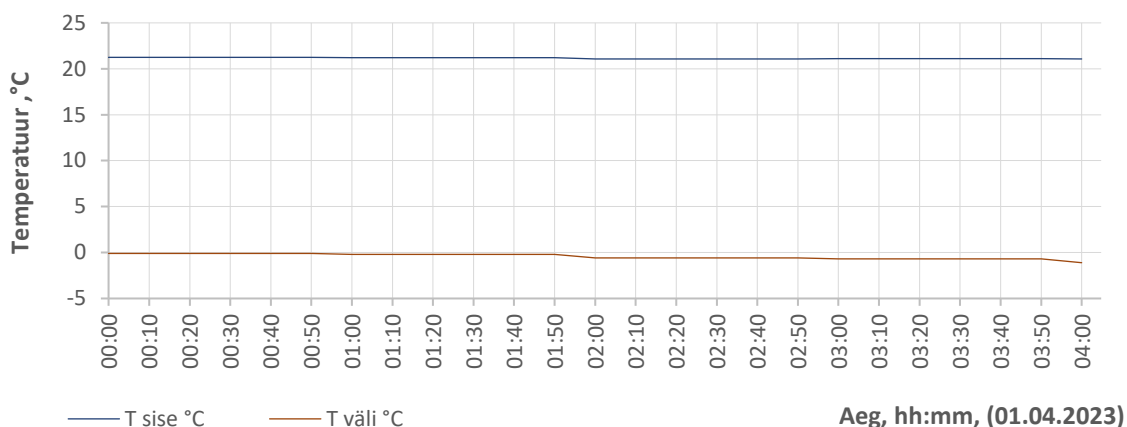
Joonis 93. Seinalõigul 41 mõõdetud soojusvoog 10-minutilise intervalliga 1.aprilli öö jooksul.



Joonis 94. 1. aprill 2023 öö testseina välis- ja sisepinna temperatuurid.



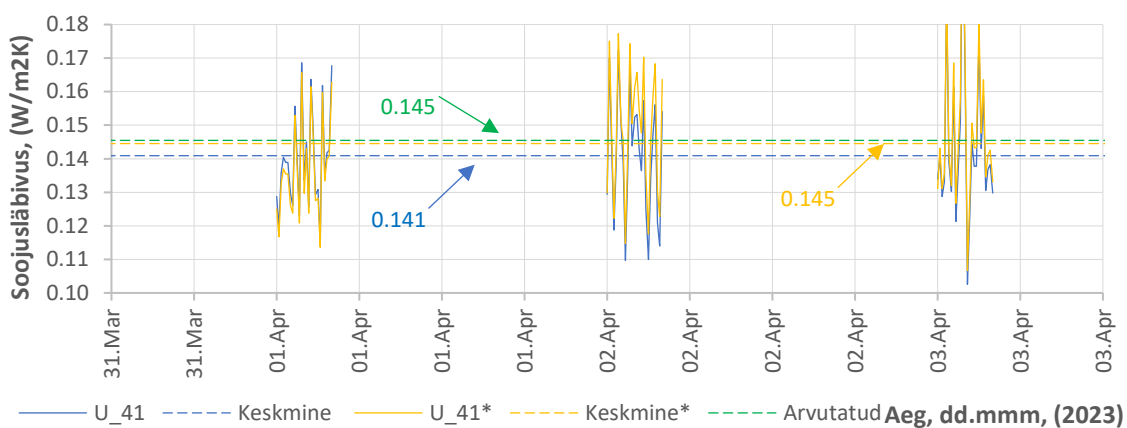
Joonis 95. Seinalõikude 41-45 arvatatud soojusläbivused õhutemperatuure arvestades, 10-minutilise intervalliga ühe öö jooksul, 1.aprill 2023.



Joonis 96. 1. aprill 2023 öö testseina välis- ja sisetemperatuurid.

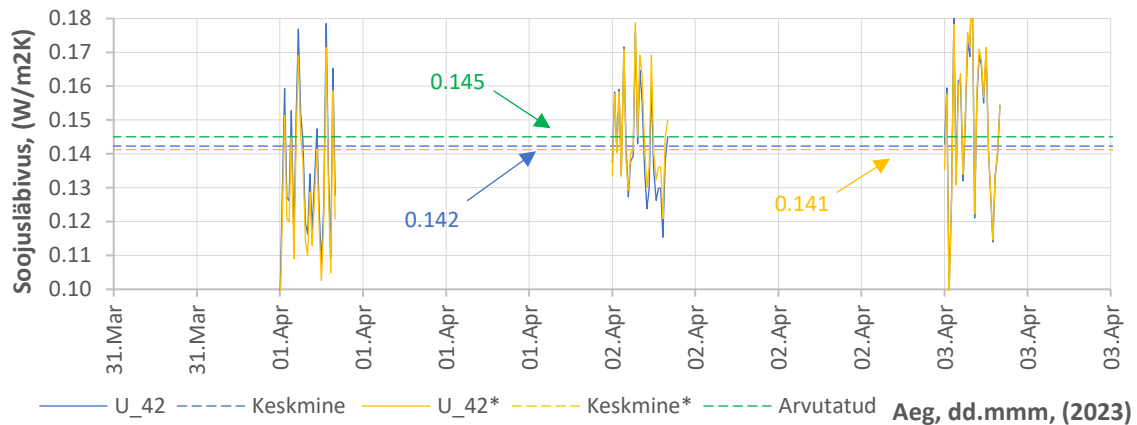
Joonis 97 Joonis 101 on toodud testseinte soojuslähivuste graafikud, kus on kujutatud nii soojuslähivuse arvutusväärtus kui ka 1. – 3. aprill öised pinna- ja õhutemperatuuride järgsed katsetulemused.

Seinalõigul 41 jäid katselised soojuslähivused arvatud väärtusega peaaegu samaks. Arvestades pinnatemperatuure saadi kolme öö keskmiseks katseliseks väärtuseks 0.141, mis on 2,8% väiksem tulemus kui arvutusväärtus. Õhutemperatuuride kaudu arvutataud soojuslähivused andsid kolme öö keskmiseks 0.145 (W/m²k), mis vastab ka arvatud väärtusele.



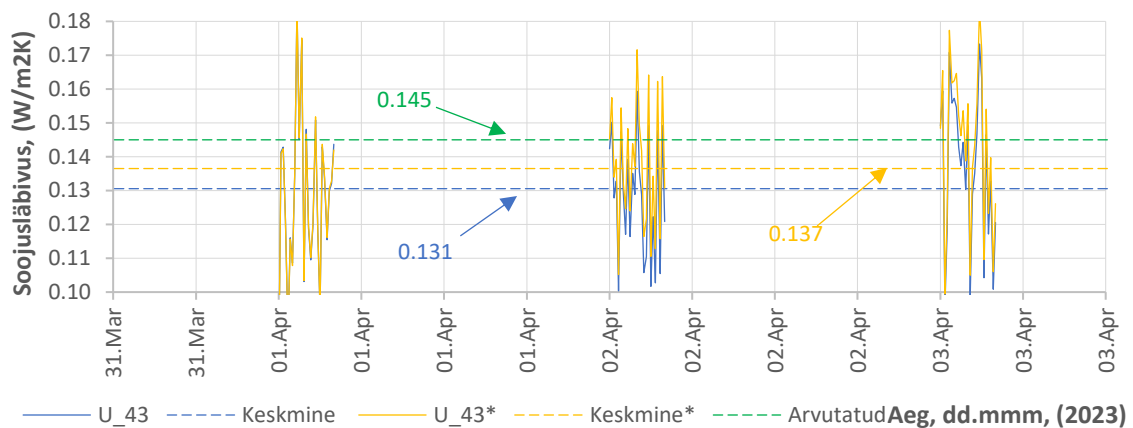
Joonis 97. Kevadise mõõteperioodi jooksul seinalõigul 41 arvatud soojuslähivused, nii pinna kui ka õhu temperatuure arvestades. Näidatud ka eeldatud arvutusväärtus.

Seinalõigul 42 jäid katselised soojuslähivused arvatud väärtusega võrreldes veidi väiksemaks. Arvestades pinnatemperatuure saadi kolme öö keskmiseks katseliseks väärtuseks 0.141, mis on 2,8% väiksem tulemus kui arvutusväärtus. Õhutemperatuuride kaudu arvutataud soojuslähivused andsid kolme öö keskmiseks 0.142 (W/m²k), mis on 2,1% väiksem tulemus kui arvutusväärtus



Joonis 98. Kevadise mõõteperioodi jooksul seinalõigul 42 arvutatud soojuslähivused, nii pinna kui ka õhu temperatuure arvestades. Näidatud ka eeldatud arvutusväärtus.

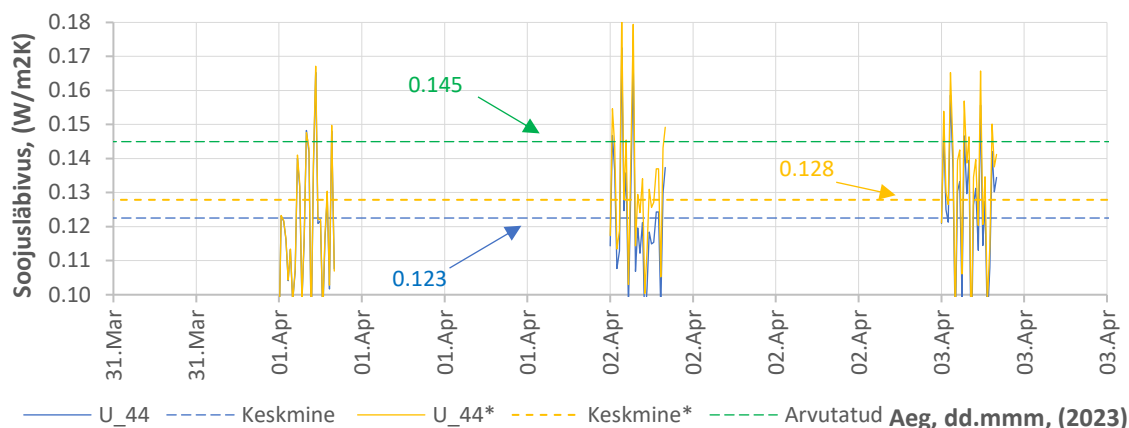
Seinalõigul 43 jäid katselised soojuslähivused arvutatud väärtusega võrreldes juba märgatava suurusjärgu võrra väiksemaks. Arvestades pinnatemperatuure saadi kolme öö keskmiseks katseliseks väärtuseks 0.131, mis on 9,7% väiksem tulemus kui arvutusväärtus. Õhutemperatuuride kaudu arvutataud soojuslähivused andsid kolme öö keskmiseks 0.137 (W/m²k), mis on 5,5% väiksem kui arvutatud väärtus.



Joonis 99. Kevadise mõõteperioodi jooksul seinalõigul 43 arvutatud soojuslähivused, nii pinna kui ka õhu temperatuure arvestades. Näidatud ka eeldatud arvutusväärtus.

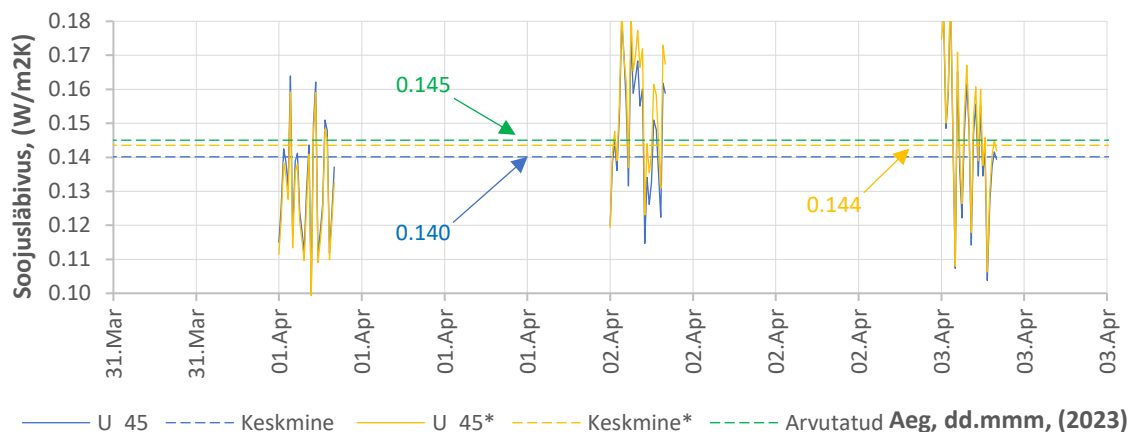
Seinalõigul 44 mõõdetud soojuslähivused jäid katsetatud testseintest kõige madalamateks. Arvestades pinnatemperatuure saadi kolme öö keskmiseks katseliseks väärtuseks 0.123, mis on 15% väiksem tulemus kui arvutusväärtus. Õhutemperatuuride

kaudu arvututud soojuslähivused andsid kolme öö keskmiseks 0.128 (W/m²k), mis on 11,7% väiksem tulemus kui arvutatud väärtus.



Joonis 100. Kevadise määteperioodi jooksul seinalõigul 44 arvutatud soojuslähivused, nii pinna kui ka õhu temperatuure arvestades. Näidatud ka eeldatud arvutusväärtus.

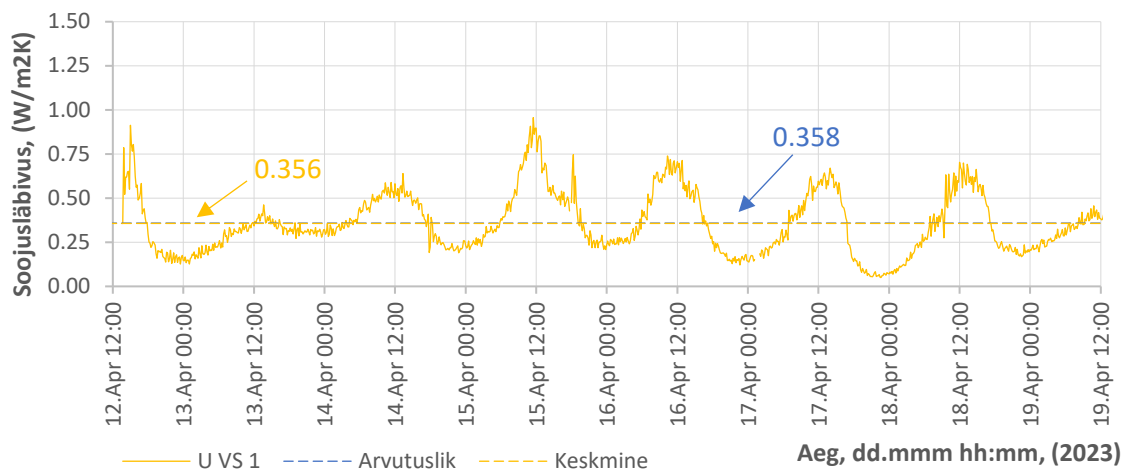
Seinalõigul 45 määdetud soojuslähivused jäid samuti madalamaks kui arvutusväärtus. Arvestades pinnatemperatuure saadi kolme öö keskmiseks katseliseks väärtuseks 0.140, mis on 3,5% väiksem tulemus kui arvutusväärtus. Õhutemperatuuride kaudu arvututud soojuslähivused andsid kolme öö keskmiseks 0.144 (W/m²k), mis on väga ligilähedane tulemus arvutusväärtusele.



Joonis 101. Kevadise määteperioodi jooksul seinalõigul 45 arvutatud soojuslähivused, nii pinna kui ka õhu temperatuure arvestades. Näidatud ka eeldatud arvutusväärtus.

Soojuslähivusi mõõdeti ka testmaja teistel seintel VS1 ja VS2, mis soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud ei olnud. Soojusvooge seintel VS1 ja VS2 registreeriti perioodil 12.aprill – 19.aprill, mille põhjal leiti ka seintele keskväärtused.

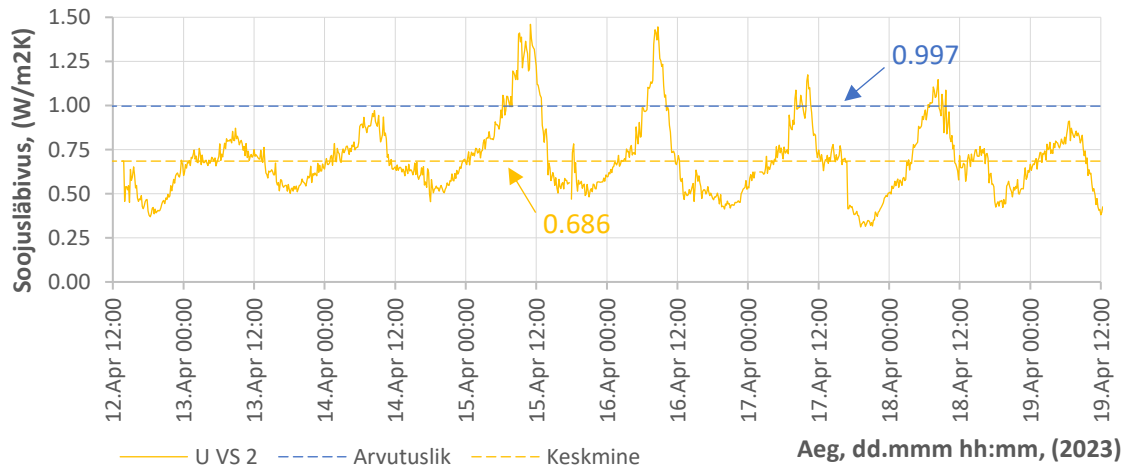
Testmaja seinale VS1, mis koosnes 200mm paksusest ristkihtliimpuit paneelist saadi arvutuslikuks soojuslähivuse väärtuseks 0.358 (W/m²k). Katseperioodi jooksul salvestatud andmete põhjal saadi keskmiseks väärtuseks 0.356 (W/m²k), mis on väga lähedane tulemus arvutatule.



Joonis 102. Kevadise mõõteperioodi jooksul testmaja seinale VS1 arvutatud soojuslähivused. Näidatud ka eeldatud arvutusväärtus.

Seinale VS2, mis koosnes 100mm ristkihtliimpuidust vastas soojuslähivuse arvutusväärtus 0.997 (W/m²k). Seinalõigu VS2 katsetulemuste keskmiseks jäi aga väärtus 0.686 (W/m²k), mis on 31% väiksem tulemus kui arvutusväärtus. Seinale VS2 kui suure soojuslähivusega tarindi arvutusväärtuse ja keskmise katsetulemuse väärtuse erinevust saab seostada sise- ja välispinna soojustakistuse määramatusega, mis omab suuremat rolli just kõrgemate soojuslähivustega tarindite korral. Selles töös leiti nii seinale VS1 kui ka seinale VS2 arvutuslikud soojuslähivused kasutades Tabel 2 väärtuseid. Siinkohal tasub aga mainida ka seda, et seinale VS1 ja VS2 soojusvoo andmete

salvestamisel kasutati kahte erinevat Squirrel seeria logerit, mis võib samuti põhjustada mõningaid erisusi katsetulemuste osas.



Joonis 103. Kevadise mõõteperioodi jooksul testmaja seina VS2 arvutatud soojusläbivused. Näidatud ka eeldatud arvutusväärtus.

4 DISKUSSIOON

Lõputöö eesmärgiks seati uurida puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiirete soojus- ja niiskustehnilist toimivust ning seejuures hinnata ka kaldvihmast põhjustatud vihmalekke mõju välispiirdele.

Testmajas läbiviidud mõõtmiste tulemuste põhjal jõuti järeldusele, et puidu ja puitkiudsoojusisolatsiooni vahel hallituse kasvuks soodsaid tingimusi ei esinenud. Puitkiudsoojusisolatsioon tagas mõõtetulemuste järgi soojustuse ja ristkihtliimpuidu vahelises mõõtepunktis piisava väljakuivamise. See tähendab, et suurt niiskuse akumulierumist ei toimunud, millest võiks järeldada, et väljakuivamise võimekus oli piisav. Teisisõnu, veeleke, mis soojustuse ja ristkihtliimpuidu vahele süstiti veeauru sisaldust sellisel määral ei tõstnud, et see oleks võrreldes referentsseinaga kajastunud mõõtetulemustes. Seevastu, kuna kõnealuses töös uuritud soojusisolatsioonimaterjal oli vägagi vett hülgav ehk ei imenud vett sisse, võis tekitatud veeleke raskusjõu mõjul liikuda allapoole tarindisee ja selle kohane info puudub, kuidas mõõtepunktides eemal väljakuivamine toimus.

Hinnates õhutõkke- ja ilmastikukaitsekanga mõju seinalõikudel 44 ja 45 konkreetsetele järeldustele ei jõutud. Kuna veelekke mõju oli sedavõrd väike ning tõenäoliselt imbus sellest suurem osa koheselt villa kihti ei olnud võimalik määrata, et kui suurt mõju puidu niiskussisaldusele omab kaitsekanga olemasolu või mitte. Üheks õhutõkke- ja ilmastikukaitsekanga mõju hindamise võimaluseks oleks koostada selle kohane arvutusmudel, kuid antud töös seda ei koostatud.

Arvutusmudeli abil on veelekke mõju antud töös uuritud välispiirde soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele hinnatud minimaalseks ka (Saare, 2023), kes samuti ei täheldanud veelekke märgatavat mõju välispiirdele.

Töös uuritud tuulutamata massiivpuidust seinalahenduse korral kujunes põhiliseks probleemiks krohvi ja soojustuse vahelises kihis esinenud hallituse risk. Lisaks kujunes põhjamaises kliimas paiknevale testmajale ohuks ka krohvi ja soojustuse vahelises kihis esinenud kõrged suhtelised õhuniiskused. Kuna talviti kõigub põhjamaises kliimas temperatuur pidevalt miinus ja plusskraadide vahel esineb aasta jooksul palju külmumistsükkleid, mis omavad suurt mõju krohvi töökindlusele ja elueale. Kuigi antud töös täheldatud ligi 100% suhtelised õhuniiskused krohvi taguses kihis ei tähenda ilmingimata veega küllastumise seisundit krohvikihis, jäädakse selles uurimuses ikkagi seisukohale, et veelekke esinemise korral tõenäoliselt krohvis veega küllastumine toimub. Sellele viitab ka sügisperioodil jäädvustatud foto, Joonis 65, kus on näha tugevat märgumist krohvi pinnal.

Sügise katseperioodi jooksul, millal süstitud veelekk koguseks oli 840 ml seinalõigu kohta tõusis suhteline õhuniiskus isegi 100% tasemele ning esines ka reaalne oht hallituse tekkeks.

Krohvi taguse lekkega seinalõigul 44, toodud joonisel Joonis 80, arvestades realselt võimalikku kriitilist olukorda, kus soojustusmaterjali tundlikkusklass oleks näiteks 2 ning kahanemistegur 0.1, oleks sügisesel lekkeperioodil jäänud hallitusindeks väärtuse 2 juurde ning samade näitajate juures oleks ilma lekketa seinalõik 41 jäänud hallitusindeksi väärtuse 1.5 juurde, joonis Joonis 77. See tähendaks seda, et mõlemal seinal eksisteeriksid mikroskoopilised hallituse kolooniad, lõigul 44 lihtsalt suuremal määral. Kuid kui arvestada ka seda, et tegemist on vaid esimese aasta prognoosiga ning kui materjali hallituse kahanemise tegur on küllaltki väike võib see omada võimendavat efekti ning järgnevate aastate hallitusindeksid võivad juba drastiliselt erineda.

Võrreldes jooniseid Joonis 77 ja Joonis 80, mis kujutavad referentsseina 41 ja krohvi taguse lekkega seinalõigu 44 hallitusindekseid materjali tundlikkuse klassi 2 korral saab hea ettekujutuse sellest kui suurt mõju omab seinale väliskliima. Kui krohvi taguse väga suure veelekk korral jäid seinalõigul 44 hallitusindeksid olenevalt kahanemistegurist keskmiselt väärtuse 1,5 juurde, siis isegi ka ilma lekketa seinalõigul jäid väärtused samade materjalomaduste korral väärtuse 1 juurde, mis samuti tagab hallituse kasvuks soodsad tingimused. Seega saab jooniste põhjal tähele panna väliskliima suurt mõju uuritud seina toimivusele juhul kui kasutatud soojustusmaterjal peaks liigituma kui hallitusele tundlik.

Kuigi hallituse risk esines kõikidel seinalõikudel, olid siiski kõige kriitilisemad hallituse indeksid just seinalõikudel 42 ja 44, kus vihmaveeleket krohvi taga ka imiteeriti. Seega hoolimata sellest, et kõik seinalõigud olid probleemsed, oli lekkega seinalõikudel ikkagi olukord nähtavalt kriitilisem.

Käesolevas uurimistöös kahjuks lõplikku hinnangut hallitusindeksite osas ei antud, kuna kasutatud soojustusmaterjali hallitustundlikkuse osas deklareeritud väärtused puuduvad ning selle töö raames nende määramiseks laboriteste ei korraldatud. Seega jääb antud töös üle vaid spekuloida arvutatud hallitusindeksite osas ning eeldada neile loogilised väärtused. Selles töös kasutatud puitkiud isolatsiooni materjal jääb suure tõenäosusega tundlikkusklassi 3, mis suurt ohtu endast ei kujutanud.

Kuigi selles töös läbi viidud ühe aastase katseperioodi jooksul esines kogutud andmete põhjal hallitusoht vaid krohvi taguses kihis, siis varasemalt antud välispiiret uurinud

(Saare, 2023) leidis, et koostatud arvutusmodelite järgi ei olnud antud välispiirde soojus- ja niiskustehniline toimivus tagatud. Saare arvutatud hallitusindeks viie aasta perioodil näitas kasvutrendi ja akumulunud niiskus ei kuivanud tarindist lõplikult välja ning hallituse tekkimise oht ristkihtliimpuit paneeli pinnal oli suur.

Seetõttu omavad taolises töös uuritud seinalahenduse korral märgilist tähtsust puitkiudvilla täpsed parameetrid, mida oleks vaja tulevikus sarnaste uurimuste läbiviimisel kindlasti näiteks labori testide abil määrata.

(Kukk et al., 2021) on varasemalt uurinud soojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust tuulutamata seinat ja on samuti mõõtnud seinat niiskusrežiimi aastase mõõteperioodi jooksul. Ka tema uuritud seinas jäi talveperioodil krohvi taguses kihis suhteline õhuniiskus 90% juurde ning suvisel perioodil jäid tulemused 60% ja 90% vahemikku. Tema töös uuritud seinat väärtused on väga iseloomulikud ka käesolevas töös uuritud seinale. Mõlema uurimuse puhul saab täheldada ka ehitustööde aegset liigniiskust krohvis, mis talve jooksul lõpuks välja kuivas.

Lisaks sarnasele liitsüsteemiga uuritud seinale on (Cukkere, 2019) uurinud ka tuulutatud massiivpuidust seinakonstruktsiooni, nii tselluvilla kui ka mineraalvilla puhul. Uuritud tuulutatud seinas jäid talveperioodil tselluvilla puhul seinat suhtelised õhuniiskused CLT ja villa vahel vahemikku 20% kuni 40% ning tõusid suvisel ajal üle 60%. Mineraalvilla puhul jäi samas asukohas talvise perioodi suhteline õhuniiskus vahemikku 20% kuni 50%, suvisel ajal 40% kuni 70%. Krohvi taguses kihis jäi tselluvilla puhul suhteline õhuniiskus suvisel perioodil vahemikku 40% kuni 80%, talvisel ajal stabiilselt 70% kuni 80%, samal ajal kui mineraalvilla puhul suvel 30% kuni 80% ning talvel 60% kuni 90%. See võrdlus kirjeldab hästi tselluvilla kui suure niiskusmahtuvusega, 'puhverkihi' omadustega materjali, mis aitab seinat väliskihis ära hoida suuri suhtelise õhuniiskuse kõikumisi vältimaks soojustusmaterjali hallitust või veeauruga küllastumist, mis talvisel perioodil soojustuse liitsüsteemiga välispiirdele ohtu kujutab. Tselluvilla suurema niiskusmahtuvuse tõttu on taolise lahenduse korral seinat niiskusrežiim stabiilsem ja ei teki sedavõrd kõrgeid suhtelise õhuniiskuse väärtusi nagu mineraalvilla puhul. Kuna tselluvilla kasutamine krohvitud seintes sedavõrd levinud ehituspraktika ei ole, võiks sellele heaks alternatiiviks olla puitkiudsoojustus.

Võrreldes käesoleva töö tulemusi (Cukkere, 2019) tulemustega on üllatav asjaolu, et ka tuulutatud seinat puhul jäi talvisel perioodil tuuletõkke taguses kihis tihtipeale suhteline õhuniiskus 90% juurde. Kuna need tulemused on küllaltki sarnased antud töös uuritud tuulutamata seinalahendusele võiks järeldada, et puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välispiire on küllaltki toimiv lahendus, seda isegi juhul kui peaks ilmne kriitilisem juhtum lekke näol, mis nagu Joonis 66 näitab suudab

lühiajaliselt kiire väljakuivamise tagada. Vihmaveelekke mõju uuritud välispiirde niiskus-soojustehnilisele toimivusele tuleb aga oluliselt pikema ajaperioodi peale analüüsida. Sellest tulenevalt tuleviku uuringud võiksid täiustatud arvutusmudeliga hinnata veelekete mõju pikas perspektiivis nii hallituse riski tekkele kui ka krohvi vastupidavusele.

Testseinte toimivuse osas suvisel perioodil, mil veeauru difusioon peaks teoorias võrreldes talvise perioodiga olema vastupidise suunaga väljast sisse difusiooni suuna muutust ei toimunud. Nagu Joonis 45 näitab on terve suvise perioodi jooksul testmaja sisene veeauru osarõhk ligikaudu 400 Pa suurem kui väliskliima veeauru osarõhk. Veeauru osarõhkude vahe on küll pea poole väiksem kui talvisel perioodil kuid siiski jäävad välised osarõhud kogu mõõteperioodi vältel väiksemaks, mistõttu difusiooni suund testseinas ei muutunud.

Ristkihtliimpuidust paneelis niiskussisalduste mõõtmisel oodatud tulemusi ei saavutatud. Kuna puitkiudvillal ja puidul on väga erinevad veeimavuse koefitsiendid, millega algselt ei arvestatud ei õnnestunud puidu niiskussisaldustes erinevusi veelekkete abil tekitada. Niiskussisalduste mõõtmisel kasutatud meetodika, milleks valiti niiskussisalduse hindamine elektritakistuse kaudu kasutades elektroodkruve antud töös arvestatavaid tulemusi ei andnud. Valitud meetodika sobib pigem kõrgemate niiskussisalduste määramiseks, alates puidu niiskussisaldusest 15%. Kuna imiteeritud veelekkete puidu niiskussisaldust sellisele tasemele ei viinud ning mingisugust loogilist seost tulemustes ei nähtud arvestati mõõdetud tulemused mõõtemääramatuse hulka.

Testseina soojusläbivuste mõõtmisel jäid tulemused arvutatud väärtusetega samasse suurusjärku. Testseinte soojusläbivusi arvutati kevadise katseperioodi käigus kuupäevadel 1.aprill kuni 3.aprill. Et vältida päikesekiirguse mõjutusi seinte soojusläbivustele väärtuste arvutamiseks kasutati öiseid salvestatud soojusvooge ja temperatuure kellaaegadel 00:00 – 04:00.

Soojusläbivused arvutati testseintele nii seinalõikude pinnatemperatuuride järgi kui ka õhutemperatuuride järgi. Tulemuste analüüsi käigus järeldati, et arvutatud tulemustele ligilähedasemaid tulemusi saavutati kasutades õhutemperatuure, mitte testseinte pinnatemperatuure. Kui pinnatemperatuuride järgi arvutatud seinalõikude keskmiseks väärtuseks jäi 0.135 (W/m²k), mis on arvutuslikust väärtusest 7% väiksem, siis õhutemperatuuride põhjal saadud tulemuste keskmiseks jäi 0.139 (W/m²k), mis on 4% väiksem tulemus kui arvutusväärtus. Tulemused erinesid kõige enam seinalõigul 44, kus pinnatemperatuuride järgi arvutatud soojusläbivus jäi arvutatust isegi 0.022 (W/m²k) väiksemaks, väärtusega 0.123 (W/m²k), mis on 15% väiksem tulemus kui arvutuslik 0.145 (W/m²k).

Massiivpuidust välispiirde soojusvoo mõõtmisi on korraldanud ka (Cukkere, 2019; Külaots, 2018), kes on erinevaid mõõtevahendeid kasutades saavutanud erinevaid tulemusi. Kui (Külaots, 2018) soojavoo arvutus- ja katsetulemused sai lugeda peaaegu täielikult kattuvateks, siis (Cukkere, 2019) mõõdetud soojusvood jäid arvatud tulemustest pea poole väiksemateks. Külaotsa ja Cukkere tööd erinesid aga selle poolest, et soojusvoo tulemuste salvestamiseks kasutatud loggerid olid erinevad. Külaotsa töös kasutati soojusvoogude salvestamiseks Squirrel logerit, Cukkere kasutas aga Evikon logerit.

Käesolevas uurimistöös kasutati samuti Squirrel logerit ning tulemused jäid küllaltki rahuldavateks. Kuigi (Külaots, 2018) uurimuses arvutustulemused ja katsetulemused soojusvoogude osas erinesid vaid 2,5%, mis on märgatavalt väiksem erinevus kui käesolevas töös 4% ja 7%, on need siiski küllaltki head tulemused võrreldes (Cukkere, 2019) Evikon logeriga saavutatud tulemusi.

Logerite mõju soojusvoo mõõtmistulemustele täheldati ka antud töös võrreldes testmaja seinte VS1 ja VS2 tulemusi, kus testseina VS1 korral saadi väga ligilähedane tulemus arvatule ning teise logeriga salvestatud seina VS2 tulemused erinesid arvatust üpriski palju.

Käesolevas uurimistöös olid ka mõned puuduseid, mis on kirjeldatud järgnevates punktides:

- Soojustusmaterjalil puuduvad deklareeritud näitajad hallitustundikkuse suhtes (tundlikkuse klass ja hallituse kahanemisetegur)
- Puidus niiskussisalduse mõõtmistel on tulemused kaheldavad, kuna antud töös kasutatud meetodika (elektroodkruvide abil takistuse määramine) ei ole sobilik sedavõrd madalate niiskussisalduste määramiseks
- Kuna soojusisolatsioonimaterjal oli küllaltki vett hülgav ehk ei imenud vett sisse, võis veeleke raskusjõu mõjul liikuda allapoole tarindisee ja selle kohta info puudub, kuidas seal väljakuivamine toimus

5 JÄRELDUSED

Selles lõputöös uuriti puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga kaetud massiivpuidust välisseinte soojus- ja niiskustehnilist toimivust viies läbi kohapealseid mõõtmisi Mäepealse 3 CLT-testmajas. Töö tulemuste põhjal võib teha järgnevad järeldused:

- Uuritud välisseinad vastasid mõõteperioodil soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele seatud hindamiskriteeriumitele, ehk hallituse tekkeks soodsaid tingimusi ei tekkinud. Mõõteperioodi vältel uuritud välisseintes niiskuse akumulatsioon (RH > 80%) puitkiudvilla soojusisolatsiooni liitsüsteemi ja ristkihtliimpuidust paneeli vahel ei toimunud. Ristkihtliimpuit oli piisava veeaurutakistusega kontrollimaks siseruumist välisõhu poole liikuvat veeauru. Difusioon ja süstitud veeleke veeauru sisaldust õhus sellisel määral ei tõstnud, et see oleks mõõdetud suhtelise õhusniiskuse väärtusi mõõtepunktis mõjutanud.
- Suvisel mõõteperioodil (juuni-august 2023), millal veeauru difusioon võrreldes talvise perioodiga võis eelduste kohaselt saavutada vastupidise suuna väliskeskkonnast siseruumi, suunamuutust ei toimunud ja siseruumi veeauru osarõhk püsis kogu perioodi vältel välisõhu osarõhust suurem. Seega antud lõputöös seinaga soojus- ja niiskustehnilist toimivust vastupidise veeauru difusiooni suuna korral ei hinnatud.
- Imiteeritud veeleke väga väikese mõju tõttu puitkiudvilla soojusisolatsiooni liitsüsteemi ja ristkihtliimpuidust paneeli vahel ei olnud võimalik õhutõkke- ja ilmastikukaitsekanga mõju hinnata uuritud välisseinte soojus- ja niiskustehnilisele toimivusele. Kaitsekanga mõju on võimalik hinnata tuleviku uuringutes, kus toimivust hinnatakse arvutusmudelite kaudu, mida saab antud uuringu mõõtetulemuste põhjal valideerida.
- Puidus niiskussisalduste hindamisel kogutud andmete põhjal järeldusi ei tehtud. Kuna imiteeritud veeleke puidu niiskussisaldusi eeldatud tasemele ei viinud loeti valitud meetodika põhjal saadud tulemused mõõtemääramatuseks.
- Töös uuritud tuulutamata massiivpuidust seinalahendusel kujunes probleemsemaiks asukohaks krohvi ja soojustuse (välispind) kihtide vahel olev mõõtepunkt, kus suhteline õhuniiskus ületas kriitilise piiri (RH > 80%), ehk esines võimalik soodne keskkond hallituse kasvuks. Hallituse mudeli kaudu hinnatud riski suurus varieerus suuresti ja seda peamiselt hallituse tundlikkuse määramisel. Eeldades, et antud uuringus kasutatud puitkiudvilla

soojusisolatsiooni hallituse tundlikkus jääb klassi 3 või 4, hallituse tekke riski soojustuse välispinnal ei tekkinud. Kirjandusest leitud info põhjal võib puitkiudvilla soojustus olla ka tundlikkuse klassidega 1 ja 2, mille järgi risk hallituse kasvuks esineb. Töös kasutatud puitkiudvilla tootel puudusid tootja poolsed deklareeritud väärtused hallituse tundlikkuse osas ning antud töös nende määramiseks iseseisvalt laborikatseid läbi ei viidud.

- Veelekkel oli märgatav mõju hallituse kasvu riskile seinalõigu 44 puitkiudvilla soojustuse välispinnal (krohvi ja soojustuse kihtide vahel) kui soojustuse hallituse tundlikkuse klassid olid 1 ja 2. Hallituse kasvu risk esines ka referents seinalõigu 41 puitkiudvilla soojustuse välispinnal tundlikkuse klassidega 1 ja 2, kuid arvatud hallitusindeksid olid väiksemad. See tähendab, et väliskliimal on suur mõju võimalikule hallituse kasvu riskile massiivpuidust puitkiudsoojusisolatsiooni liitsüsteemiga välispiiretel. Seepärast on oluline, et tuleviku uuringud sisaldaksid materjalide hallituse tundlikkuse määramist täpsema hallituse kasvu riski hindamiseks.
- Veeleke krohvi ja soojustuse kihi vahel seinalõigul 44 põhjustas ka märgatava krohvi märgumise lekke asukohas. Võis eeldada, et märgumine põhjustas ka krohvi niiskussisalduse küllastuspiiri ületamise. Pidev krohvi märgumine talvisel perioodil võib külmumistsüklite tagajärjel tekitada krohvile mehaanilisi kahjustusi nagu pragunemisi. Seevastu antud uuringus kasutatud krohv võimaldas märgunud krohvi kiiret väljakuivamist. Sellest tulenevalt on oluline tulevikus täpsemalt uurida veelekke mõju krohvi elueapikkusele külmumistsüklite korral.
- Mõõdetud soojusvoogude kaudu leitud soojusläbivused sarnanesid uuritud välisseinte arvutuslike väärtustega. See kinnitas seinte ehitusel kasutatud materjalide deklareeritud soojuseriitivuste väärtuste õigsust ja seinte enda soojustehnilist toimivust. Arvutustulemustele ligilähedasemad soojusläbivused saadi kasutades õhutemperatuure võrreldes testseinte pinnatemperatuuride kasutamisega.

6 KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- About ETICS - European Association for ETICS (EAE). (2023). <https://www.ea-etics.com/etics/about-etics/>
- AlSayegh, G. (2012). *Hygrothermal Properties of Cross Laminated Timber and Moisture Response of Wood at High Relative Humidity*.
- Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. In *Building and Environment* (Vol. 114, pp. 307–332). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- Brandner, R. (2013). *Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report*. <https://www.researchgate.net/publication/261884030>
- Bytтеbier, M. (2017). *Hygrothermal performance analysis of cross-laminated timber (CLT) in Western Europe*.
- Cukkere, L. (2019). *Ristkihtliimpuidust välisseinte välimõõtmised ja hügrotermilise jõudluse modelleerimine*.
- Eesti Keskkonnastrateegia aastani 2030. (2007). www.envir.ee
- Energiapoliitika: üldpõhimõtted. (2015). Euroopa Parlament.
- EVS-EN 13183-1. (2002). *Saematerjali üksuse niiskussisaldus*.
- EVS-EN 16351 2015 *Timber structures- Cross laminated timber*. (2015).
- EVS-EN ISO 10456:2008 - *EVS standard evs.ee | en*. (n.d.). Retrieved August 2, 2023, from <https://www.evs.ee/en/evs-en-iso-10456-2008>
- EVS-EN ISO 12572:2016 - *EVS standard evs.ee | en*. (n.d.). Retrieved August 2, 2023, from <https://www.evs.ee/en/evs-en-iso-12572-2016>
- EVS-EN ISO 13788:2012 - *EVS standard*. (2012). Eesti Standardikeskus. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13788-2012>
- EVS-EN ISO 15148:2003 - *EVS standard evs.ee | en*. (n.d.). Retrieved July 26, 2023, from <https://www.evs.ee/en/evs-en-iso-15148-2003>
- EVS-EN ISO 15927-3:2009 - *EVS standard*. (2009). Eesti Standardikeskus. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-15927-3-2009>
- Franco, J. T. (2019). *Is Cross-Laminated Timber (CLT) the Concrete of the Future?* ArchDaily. <https://www.archdaily.com/922980/is-cross-laminated-timber-clt-the-concrete-of-the-future>
- Godonou, P. (2022). *Design of timber structures*. www.swedishwood.com.
- Hagentoft, C.-E. (2001). *Carl-Eric Hagentoft*.
- Jörg, M. (2010). *Holz und Klimaschutz*.
- Kukk, V., Kaljula, L., Kers, J., & Kalamees, T. (2022). Designing highly insulated cross-laminated timber external walls in terms of hygrothermal performance: Field measurements and simulations. *Building and Environment*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108805>
- Kukk, V., Kers, J., & Kalamees, T. (2021). Field measurements and simulation of an massive wood panel envelope with ETICS. *Wood Material Science and Engineering*, 16(1), 27–34. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1712738>
- Külaots, A. (2018). *Seespoolse lisasoojustusega ristkihtliimpuidust seinte soojus- ja niiskustehnilise toimivuse hindamine*.
- 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>
- Liisma, E., Lõhmus, G., & Raado, L. M. (2015). The effect of temperature and humidity on the permanence of external thermal insulation composite systems. *Procedia Engineering*, 108, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.156>
- Liismaa, E., Raado, L.-M., Lumi, Si., Lill, I., & Sulakatko, V. (2014). *The Effect of Moisture Content of Insulation Boards on the Adhesion Strength of ETICS*. Recent Advances in Civil Engineering and Mechanics.

- Lipand, R. (2021). *CAPILLARY MOVEMENT OF WATER IN A RADIAL DIRECTION AND MOISTURE DISTRIBUTION IN A CROSS-SECTION OF CLT PANEL*. TalTech.
- Lstiburek, J. (1999). *Wood Durability*.
- McClung, R., Ge, H., Straube, J., & Wang, J. (2014). Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies with built-in moisture: Field measurements and simulations. *Building and Environment*, 71, 95–110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.008>
- Moisture content of a piece of sawn timber - Part 2: Estimation by electrical resistance method. (2002). In *European Standard*.
- Products: STEICO. (n.d.). Retrieved August 2, 2023, from <https://www.steico.com/en/products/etics/steico-etics-timber/steicoprotect-dry>
- Saare, K. (2023). *VIHMALEKKE MÕJU PUITKIUDSOOJUS-ISOLATSIOONI LIITSÜSTEEMIGA KAETUD MASSIIVPUIDUST VÄLISPIIRETE SOOJUS-JA NIISKUSTEHNILISELE TOIMIVUSELE*.
- Simpson, W. T. (1991). *Dry kiln operator's manual*. <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/usda/ah188/ah188.htm>
- SM700 Pro - Knauf. (n.d.). Retrieved August 2, 2023, from <https://www.knauf.co.uk/systems-and-products/products/exterior/external-renders/adhesives-and-basecoats/sm700-pro/sm700-pro>
- SOLITEX ADHERO 1000 | pro clima international. (n.d.). Retrieved August 2, 2023, from <https://proclima.com/products/external-sealing/solitex-adhero-1000>
- Sulakatko, V. (2019). *Modelling construction process impact factors on degradation of thin rendered facades: Vol. Doctoral Thesis*.
- Tanaka, E., Schwerd, R., Krueger, N., Hofbauer, W., & Zirkelbach, D. (2021). *Laboratory tests on decay of natural fibre insulation materials suggest a more differentiated evaluation and higher RH thresholds*.
- Tatra, A. (2023). *Raudbetoonist, ristkihtliimpuidust ja poorbetoonist uute projekteeritavate kortermajade süsiniku jalajälge võrdlev analüüs*.
- Teibinger, Martin., & Matzinger, Irmgard. (2013). *Bauen mit Brettsper Holz im Geschossbau, Fokus Bauphysik : Planungsbroschüre*. Holzforschung Austria.
- The benefits of building CRE structures*. (2022). <https://canada.constructconnect.com/dcn/news/projects/2019/03/hineshttps://www.lendlease.com/us/-/media/llcom/investor-relations/media-releases/2018/mar/20180305>
- Tooted – CLTest. (n.d.). Retrieved August 1, 2023, from <https://clt.ee/tooted/>
- Vay, O., De Borst, K., Hansmann, C., Teischinger, A., & Müller, U. (2015). Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions. *Wood Science and Technology*, 49(3), 577–589. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0716-x>
- Viitanen, H., & Ojanen, T. (2007). *Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials*.
- Viitanen, H., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Vinha, J., Lähdesmäki, K., Salminen, K., & Viitanen, S. (2011). *Mould Growth Modelling to Evaluate Durability of Materials*.
- Vinha, J. (2007). *Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions*.
- Wang, J., Mukhopadhyaya, P., & Morris, P. (2013). *Wood sorption, capillary condensation and their implications for building envelopes of wood construction*. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=da01dd4d-2fd0-4994-8c8b-7beb7c2c8584>
- What is EIFS / ETICS?* - Terraco Group. (2023). Terraco Group. <https://www.terraceo.com/za/what-is-eifs-etics/>
- Wood Fibre Insulation - Advantages and Disadvantages*. (2021). <https://www.eco-home-essentials.co.uk/wood-fibre-insulation.html>