



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

# VAHVÄRKSEINA SEESPOOLSE SOOJUSTAMISE KATSELINE JA ARVUTUSLIK UURIMINE

## EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDY OF INTERNAL INSULATION ON HALF-TIMBERED WALLS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: .....Karro Haav.....  
/nimi/

Üliõpilaskood .....182264EAEI.....

Juhendaja: .....Paul Klõšeiko, .....  
/nimi, amet/

Tallinn 2024

*(Tiitellehe pöördel)*

## **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.

"22" mai 2024

Autor: Karro Haav

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"22 " mai 2024

Juhendaja: Paul Klõšeiko

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....2024

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina \_\_\_\_\_ Karro Haav \_\_\_\_\_ (autori nimi)

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
Vahvarkseina seespoolse soojustamise katseline ja arvutuslik  
uurimine

\_\_\_\_\_ /  
(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on \_\_\_\_\_ Paul Klõšeiko \_\_\_\_\_,  
(juhendaja nimi)

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

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

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

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

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# TalTech ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** .....Karro Haav, 182264..... (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava, peeriala: .....EAEI, Ehitiste projekteerimine.....(kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** .....Paul Klõšeiko, 55642747..... (amet, nimi, telefon)  
**Konsultant:** .....(nimi, amet)  
..... (ettevõtte, telefon, e-post)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Vahvarkseina seespoolse soojustamise katseline ja arvutuslik uurimine  
(inglise keeles) Experimental and computational study of internal insulation on half-timbered walls

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Vahvarkseina erinevate seespoolse lisasoojustuse lahenduste katseline uurimine
2. Arvutusmodelite täpsuse kontroll ja vajadusel nende täpsustamine
3. Pikaajalise toimivuse kontroll modelleerimise teel

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Metoodika kirjeldus ja kirjanduse ülevaade	26.02
2.	Mõõtmistulemuste ja modelleerimise võrdlus	21.04
3.	Modelleerimine kriitilistel ääritingimustel	06.05

**Töö keel:** .....eesti..... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "22" mai 2024 a

**Üliõpilane:** .....Karro Haav..... "22" mai 2024 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** .....Paul Klõšeiko..... "22" mai 2024 a  
/allkiri/

**Konsultant:** ..... ".....".....2024 a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....2024 a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÕNA.....	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
1.    SISSEJUHATUS.....	10
1.1 Üldist .....	10
1.2 Varasemad uuringud .....	11
1.3 Uurimisvajadus.....	13
1.4 Eesmärgid.....	14
2 METOODIKA .....	16
2.1 Välikatse Keeni mõisas.....	16
2.1.1 Uuritav seinakonstruktsioon ja soojustusmaterjalid.....	16
2.1.2 Mõõteseadmed.....	21
2.1.3 Sisekliima .....	23
2.2 Arvutuslik analüüs.....	24
2.2.1 Üldist.....	24
2.2.2 Programi Delphin tööpõhimõte.....	25
2.2.3 Mõõdetud ja kasutatavad materjaliandmed.....	28
2.2.4 Arvutusmudel .....	30
3 MÕÕTMISTULEMUSED .....	33
3.1 Kliimatingimused .....	33
3.2 Materjalide reageerimine kliimatingimuste muutustele – suhteline niiskus ja temperatuur soojustuse ja esialgse seina vahel.....	35
3.3 Soojusläbivus ja pinnatemperatuur .....	37
3.4 Mõõtmistulemuste hindamine ja analüüs .....	38
4 ARVUTUSLIK ANALÜÜS.....	41
4.1 Mudeli kalibreerimine.....	41
4.1.1 Arvutustulemused.....	41
4.1.2 Kalibreerimistulemuste hindamine.....	48
4.2 Pikaajalise toimivuse kontroll .....	52
4.2.1 Kokkuvõtlikud arvutustulemused ja tulemuste hindamine ..	52

KOKKUVÕTE.....	72
ENGLISH SUMMARY .....	74
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	76
LISAD.....	79
GRAAFILINE OSA .....	80

## **EESSÕNA**

Antud lõputöö on tehtud Ehituse ja arhitektuuri instituudi „Keeni mõisa välisseinte seespoole lisasoojustuse niiskustehniise toimivuse konsultatsioon ja arendustöö“ raames. Lõputöö eesmärgiks oli kalibreerida Delphin arvutusmudel, analüüsides välikatse mõõtmistulemusi ja võrreldes neid mudeli omadega. Kalibreeritud mudeliga viidi läbi pikaajaline 48-aasta pikkune simulatsioon, mille põhjal hinnati erinevate soojustuslahenduste toimivust vahvärkseina seespoolisel soojustamisel. Andmed saadi ja koguti Keeni mõisast, materjalide katselised omadused saadi Tallinna Tehnika Ülikooli laborist, kliimaandmed saadi Keskkonnaagentuuri Ilmateenistuselt.

Soovin tänada oma juhendajat abi, nõu ja suunamise eest; Neemet mõõtmissüsteemi koostamise ja haldamise eest; Kristinat materjalide katsetamise eest.

## Lühendite ja tähiste loetelu

PIR	polüisotsüanuraat
CaSi	kaltsiumsilikaat
PUR-CM	polüuretaanvaht
AAC	poorbetoon
EPS	vahtpolüstüreen
CCR-test	„capillary condensation redistribution test“
U-arv	Piirde soojusläbivus, $[W/m^2 * K]$
RH	suhteline niiskus, [%]
$\lambda$	materjali soojuserijuhtivus, $[W/m * K]$
$\mu$	materjali veeauru difusioonitakistustegur, [-];
$A_w$	materjali veeimavus, $[kg/m^2 h^{0.5}]$
$R_{si}$	sisepinna soojustakistus, $[m^2 * K/W]$
$R_{se}$	välispinna soojustakistus, $[m^2 * K/W]$
$w_{REV}^{m_w+v}$	elementaarmarhu niiskussisaldus (vedeliku ja veeaur, $[kg/m^3]$ );
$g_{conv}^{m_w}$	veevoog materjali poorides ja pooride pinnal (kapillaarne liikumine), $[kg/m^2 s]$ ;
$g_{conv}^{m_v}$	veeauru konvektsioonivoog, $[kg/m^2 s]$ ;
$g_{diff}^{m_w}$	veeauru difusioonivoog, $[kg/m^2 s]$ ;
$\sigma_{REV}^{m_w+v}$	niiskuslisa/-kadu antud elementaarmahus, $[kg/m^3 s]$ .
$c_l^{m_w}$	tegur, mis määrab vee kontsentratsiooni vedelikus, [-];
$-\delta_l(\psi)$	materjali vee-erijuhtivus, $[kg/m * s * Pa]$ ;
$P_l$	vee poorirõhk, $[Pa]$ ;
$\rho_l$	vedela vee tihedus, $[kg/m^3]$ ;
$g$	gravitatsioonikonstant, $[m/s^2]$ .
$p_{sat}(T)$	veeauru küllastusrõhk, $[Pa]$ ;
$T$	temperatuur, $[^{\circ}K]$ .
$p_v$	veeauru osarõhk, $[Pa]$ ;
$p_a$	õhurõhk, $[Pa]$ ;
$R_a$	universaalne gaasikonstant, $[J/(kg * K)]$ ;
$R_v$	veeauru gaasikonstant, $[J/(kg * K)]$ ;
$g_{conv}^{m_v}$	konvektiivne veeauruvoog, $[kg/(m^2 s)]$ .
$D_a(T)$	seisva õhu veeauruerijuhtivus, $[(m^2/s)]$ ;
$f(\psi_g)$	funktsioon gaasi mahust ruumalaühikus, [-];
$\psi_g$	gaasi maht ruumalaühikus, $[(m^3/m^3)]$ .
$t$	temperatuur, $[^{\circ}C]$ .
$\psi_{por}$	materjali poorsus, $[(m^3/m^3)]$ ;

$\psi_l$	vee maht ruumalaühikus, $[(m^3/m^3)]$ .
$\delta_p(\psi)$	materjali veeaurerijuhtivus, $[kg/m * s * Pa]$ ;
$p_v$	veeauru osarõhk, $[Pa]$ .
$\rho_{REV}^U$	siseenergia tihedus elementaarmahus, $[J/m^3]$ ;
$q_{diff}^Q$	soojusvoog, $[W/m^2]$ ;
$u_l(T)$	vee erisiseenergia, $[J/kg]$ ;
$g_{conv}^{m_l}$	konvektiivne veevoog, $[kg/(m^2 * s)]$ ;
$u_g(T)$	gaasi eri siseenergia, $[J/kg]$ ;
$g_{conv}^{m_g}$	gaasikonveksioonivoog, $[kg/(m^2 * s)]$ ;
$h_v(T)$	erialpia veeauru jaoks, $[J/kg]$ ;
$g_{diff}^{m_v}$	veeaurudifusioonivoog, $[kg/(m^2 * s)]$ ;
$h_{voc,g}(T)$	lenduvate orgaaniliste osakeste erialpia, $[J/kg]$ ;
$g_{diff}^{m_{voc,g}}$	lenduvate orgaaniliste osakeste difusioonivoog, $[kg/(m^2 * s)]$ ;
$\sigma_{REV}^U$	energiakaod/-lisad antud elementaarmahus, $[W/(m^3 * s)]$ .
$T_s$	siseõhu temperatuur, $[°C]$ ;
$T_v$	välisõhu temperatuur, $[°C]$ .
$v_s$	siseõhu veeaurusisaldus, $[\frac{g}{m^3}]$ ;
$v_v$	välisõhu veeaurusisaldus, $[\frac{g}{m^3}]$ ;
$\Delta v_{5°C}$	niiskuselisa välisõhu temperatuuril $T_v \leq 5°C$ , $[\frac{g}{m^3}]$ .

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1 Üldist

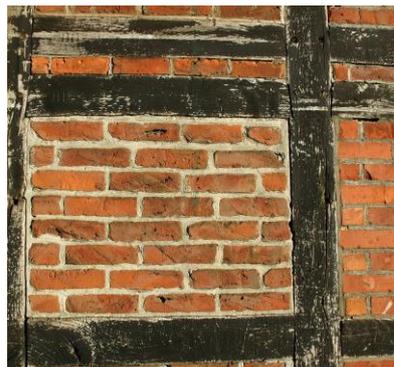
Viimase aastakümne üheks aktuaalseimaks teemaks on olnud kliima soojenemine, taastuvenergia ning keskkonna päästmine ja selle säästmine. On mõistetud, et ehitussektori energiatarbimine, materjalide kasutamine ja süsihappegaasi emissioon mängib kõige selle juures suurt rolli ning on hädavajalik seda olukorda parandada. Uute ehitiste ehitamisel ja projekteerimisel on läinud hoonete energiatarbimise, materjalide kasutamise, ringmajanduse, taastuvenergia kasutamise ja keskkonna sõbralikkusega seoses nõuded aina karmimaks. Ehitatakse liginullenergiahooneid, taastuvenergia tähtsus on kõrge, kasutatakse päikesepaneele, tuulegeneraatoreid, soojustagastiga tehnosüsteeme ning materjalide taaskasutamine ja ringmajandusse saatmise läbimõtlemine on olulisel kohal. (*Kurnitski, J. et al., s.a.*) Kuid mida teha olemasolevate hoonetega, mis on aastatega amortiseerunud ning ei ole ehitatud ega projekteeritud arvestades tänapäevaseid energiatõhususe miinimumnõudeid.

Selleks, et parandada olemasolevate hoonete energiatõhusust on üheks peamiseks ja oluliseimaks tegevuseks hoone piirdetarindite renoveerimine. Seinte lisasoojustamine suurendab hoone soojapidavust, vähendab energiatarbimist ja parandab energiatõhusust. Seinä väliskihti paigaldatud soojustusekiht hoiab seinä soojana ning ei lase talvel toas oleval soojal läbi seinä välja minna, seega tuba püsib kauem soe ja küttekulud on väiksemad. Soojustusekihi lisamine välispinda aga tähendab hoone välisilme ja gabariitide muutumist, mis läheb vastuollu hoonetega, mis on kuulutatud kultuurimälestiseks või asuvad miljööväärtuslikul alal, mille välisilme peab säilima.

Kuid ka kultuurimälestiste hulka kuuluvate hoonete seinad on vaja energiatõhususe parandamiseks soojustada. Just selliste vanade hoonete seinakonstruktsioonid on võrreldes tänapäevaste nõuetega väga halva soojapidavusega, lisaks on vanade, kultuurimälestisteks kuulutatud hoonete seinte pinnad külmad, millest tuleneb soojuslik ebamugavus, hallituseoht ja üleüldine ebamugavus ja risk elaniku tervisele.

Üheks selliseks ajalooliseks seinakonstruktsiooniks on vahvärksein. Vahvärkseina puhul on tegemist puitkarkassist seinaga, kus puidu raami vahed on täis laotud tellistest, savist või looduslikust kivist (Joonis 1.1, parem). Eriti populaarne on selline konstruktsioon kesk-euroopas ja peamiselt tuntud Saksamaal. Traditsioonilisel vahvärkseinal on puitkarkass välisfasaadil nähtav (Joonis 1.1, vasak). Kuna hoone välisilme tuleb säilitada, on ainuke võimalus soojustuse lisamiseks kasutada seespoolset lisasoojustust. Vastupidiselt väljast soojustamisega, muudab seespoolne soojustamine seinakonstruktsiooni külmaks. Välisõhk jahutab seinä väljaspoolt maha ning kuna soojustus on sooja ruumi pool, ei saa toa soe seinä soojana hoida. Selle tagajärjel

langeb temperatuur olemasoleva konstruktsiooni ja lisatud soojustuse kihi vahel. Temperatuuri langusega aga tõuseb suhteline niiskus, mis toob endaga kaasa niiskus- ja hallitusprobleemid. Kuna telliskonstruktsioonide omadused erinevad suuresti puidu omadustest, on vahvärkseinte puhul seespoolne soojustamine eriti riskantne. Lisaks tellise pinna hallitamisele lisandub oht puidukahjuritele ja puidu mädanemisele, lisaks tuleb arvestada, et puit on materjalina niiskuse suhtes palju tundlikum kui telliskonstruktsioon. (EVS-EN ISO 13788, s.a.)



Joonis 1.1 (vasakul) Vahvärkseintega hooned Saksamaal (Pildi autor: Jaimrsilva, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=42475202>), (paremal) tellis laotud puitkarkassi vahele. (Pildi autor: Harald Bischoff, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15833918>)

Käesolev töö analüüsib seespoolse soojustamise lahenduste niiskus- ja soojustehnilise toimivuse aspektist vahvärkseinte puhul.

Töö annab ülevaate:

- Erinevate soojustuslahenduste katsetamisest Keeni mõisa vahvärkseina peal
- Katse tulemustest ja nende soojustuslahenduste toimivuse analüüsist
- Uuritud seina arvutuslikust analüüsist ja arvutuse võrdlusest katse tulemustega
- Seina pikaajalise toimivuse analüüsist ja hinnangust
- Tulemuste järeldest

## 1.2 Varasemad uuringud

Kuna on teada, et seespoolne soojustamine on riskantne ning toob endaga kaasa rida probleeme, on tehtud erinevaid uuringuid, et leida töötav lahendus, mis tagaks tervisliku sisekliima, vältiks niiskuse kogunemist soojustuse kihi taha ning hoiaks ära hallituse tekke.

Üks uurimus viidi läbi Saksamaal Bambergis (Bottino-Leone et al., 2019), kus erilise tähtsuse alla toodi seespoolse soojustusmaterjali omadused ja ka nende paigaldusviis ja -kvaliteet. Toodi välja niiskuskahjustuste vältimise tähtsus, selleks arvestati

simulatsioonides auru difusiooni, vedelike ja niiskuse kapillaarset liikumist, kaldvihma olemasolu ja mõju ning konstruktsiooni õhutihedust. Need simulatsioonid aitasid hinnata niiskuse kondenseerumise, hallituse kasvu ja puidu mädaniku ohtu ja olemasolu. Simulatsioon viidi läbi Delphin programmis ühe ja sama aasta kliimaparameetritega, mis iga aasta kordusid. Kasutati kuute erinevat soojustusmaterjali, mille hulka kuulusid: kaltsiumsilikaat, perliittellis, tselluloos, mineraalvaht, puidukiud ja korkmaterjal. Uurimusega avastati, et sõltumata soojustuse lahendusest on puidu kahjustuste vältimiseks vajalik fassadi kaitsmine kaldvihma eest vetthülgava krohviga. Ilma selleta olid kõikide soojustuste puhul puidu kriitilised punktid halvas seisus. Krohvi väljavahetamisel ei andnud ükski soojustus kriitilisi niiskuse väärtusi, seega antud uuringu järgi ei sõltunud puidu olukord mitte soojustuse lahendusest vaid kaitsest kaldvihma eest. Konstruktsioon, mis oli uurimuse all oli saksapärase vahvärkseini, kus puit ulatus välja ka välispinnale, mis suurendab kaldvihma halba mõju.

Teine sarnane uurimus (Jensen et al., 2021) viidi läbi Taanis, kus ehitati katseseinad, millega üritati jäljendada vanu massiivtellis- ja vahvärkseina konstruktsioone. Katseseinasid olid nii ainult tellisest, puitplaadiga, kui ka telliste sisse pandud 175x175mm puitkarkassiga, mis oli 100mm müüri sisse paigaldatud. Enne mõõtmiste alustamist lasti katseseintel välja kuivada ja alles seejärel paigaldati erinevad soojustuse lahendused, mida jälgiti kaks ja pool aastat. Tulemused näitasid, et seespoolse soojustuse lisamine suurendab puidu kriitilistes punktides suhtelist niiskust, lisaks näitasid tulemused samamoodi, et välispinna hüdrofobiseerimine mõjub puidule ja tema säilimisele positiivselt ja vähendab hallituse tekke riski. Ilma välispinda hüdrofobiseerimata oli hallituse risk soojustuse ja tellise vahel kõikidel juhtudel kriitiline. Lisaks tuli välja asjaolu, et veeauru difusioonile avatud kapillaaraktiivsete soojustusmaterjalide puhul on hallituse oht väiksem kui veeauru difusioonile suletud soojustusmaterjalide puhul. Seega olemasoleva märja seina puhul, võib arvata, et kui ei teostata väliskihi hüdrofobiseerimist, siis töötavad paremini auru juhtivad soojustuslahendused.

Sama autori poolt, on läbi viidud veel üks sarnane uurimus, (Jensen et al., 2020) kus 2-4 aastase mõõtmisperioodi põhjal viidi läbi pikaajaline simulatsioon neljale erinevale soojustuslahendusele. Soojustati seespoolt kiviseina, mille sisse oli samamoodi paigaldatud puidust talad/postid. Mõõtmised viidi läbi Taanis, seega kliima on sarnane meie analüüsimise all oleva seinaga. Katses kasutati soojustuslahendustena kolme difusioonile avatud kapillaaraktiivset lahendust: 1) 40mm PUR-CM 2) CaSi isolatsiooniplaati 3) AAC ehk poorbetooni ning neljandaks difusioonile suletud soojustusena fenoolset vahtu. Tulemused näitasid, et mida madalam on niiskuskooormus hoone sees, seda vähem niiskust tekib kriitilistesse punktidesse soojustuse taha.

Samuti oli niiskuslik olukord soojustuse taga seda hullem, mida paksem oli soojustuse kiht. Mida paksem on sein konstruktsioonis kivi kiht, seda hullem on niiskuslik olukord seinas, sest seinal on raskem välja kuivada ja see võtab rohkem aega. Simulatsioone viidi ka läbi erinevaid telliseid katsetades ning tulemustest oli näha, et sõltuvalt tellise omadustest erilisi erinevusi sein niiskuslikus toimivuses ei leitud. Lisaks nagu ka eelnevad uurimused on näidanud, siis väliskihi hüdrofobiseerimine näitab positiivset mõju niiskuslikule toimivusele CaSi puhul. Pikaajalises simulatsioonis andsid parimaid tulemusi difusioonile avatud soojustused CaSi ja PUR-CM ning ainuke soojustuse lahendus, mille puhul ei nähtud ühtegi kriitilist hetke hallitusmudelil oli CaSi. Samuti täheldati, et puidu ümbruses on riskid kõvasti suuremad kui tellise lõigetel ja seda sõltumatult soojustuse tüübist.

Kõikide nii ainult ajalooliste kiviseinte seespoolse soojustamise kui ka vahvarkseinte seespoolse soojustamise kohta tehtud uuringutest kujuneb välja kindel väide, et sellised ajaloolised seinad on kõik erinevates olukordades, erinevast materjalist ja erinevas kliimas ning edukaks ja toimiva soojustuslahenduse leidmiseks on vaja igat olukorda eraldi uurida, et saada parim ja töötav lahendus.

### **1.3 Uurimisvajadus**

Vahvarkseinad on ajaloolise tähtsusega seinakonstruktsioonid, kus vanimad näited Euroopas ulatuvad sajandite kaugusele. Tänapäevani säilinud hooned, kus on seda sorti sein konstruktsioon kasutusel ja veel alles, on levinud küll Kesk-Euroopas, kuid kõigest mõned üksikud näited saab tuua Eestist.

Üks nendest näidetest on Valga maakonnas asuv Keeni mõis (vaata Joonis 2.1). Varasemad teated mõisast on 1551. aastast. Härrastemaja pärineb tõenäoliselt 18. sajandi lõpust või 19. sajandi algusest. (Maiste, 1984). Hoone kasutusele võtmiseks on vaja seinad renoveerida ja muuta soojapidavamaks, kuna välisilme muutmine lubatud ei ole, tuleb soojustus paigaldada sissepoole. Konstruktsioone avades ja uurides leiti, et puitkarkassi vahel on erinevates mõõtudes käsitsi tehtud telliskivid. Selline sein on ajalooliselt haruldane ja väärtuslik nähtus ning igal juhul tuleb teha kõik, et säilitada selline seinakonstruktsioon ning vältida selle lagunemist ja välja vahetamist.

Hoone on seisnud pikalt külmana, mistõttu on massiivseinad märjad ja niisked. Nagu eelnevalt mainitud on juba kuiva seina seespoolne soojustamine riskantne ning tekitab ohtlikku niiskust ja hallituseprobleeme. Seetõttu on äärmiselt oluline arvestada olemasolevat reaalselt olukorda, teada materjalide täpseid omadusi, vaadata ja mõõta erinevate soojustuslahenduste käitumist antud olukorras, et tagada ajaloolise seina säilimine, puidu mädanemise vältimine ja hallitustekke ära hoidmine.

Eelnevalt on uuritud nii lihtsalt ajaloolise kiviseina seespoolse soojustamise toimimist kortermajades (Latz et al., 2022), koolimajades (Klößeiko & Kalamees, 2022), muudes ajaloolistes hoonetes (Giuseppe et al., 2020), erinevate vahvarkseinte olukordi ja lahendusi kirikutes (Beata Nowogońska, 2020), elamutes (Amirzadeh et al., 2018) ja mujal (Jarosz, 2014). On vaadeldud nii soojustuse materjale kui ka erinevate soojustuse paksuse mõjusid. (Amirzadeh et al., 2018; Worch & Stelzmann, 2019).

Need eelnevalt tehtud uuringud ei ole erinevate materjali omaduste ja kliima tingimuste tõttu piisavalt asjakohased, et neid võtta aluseks lahenduse pakkumiseks ilma täpsema uuringuta ja mõõtmist teostamata ning ei piisa ka seespoolse soojustuse lahendusi pakkuva raamatu kätte võtmisest. (Eßmann, 2022). Küll aga annavad nad meile ettekujutuse mis suunas liikuda ja mis on olulised kohad seespoolse soojustamise juures. Selliste väärtuslike seinakonstruktsioonide puhul, kus on tegemist äärmiselt ohtliku ja riskantse olukorraga, on igal juhul vajalik täiendava uurimustöö tegemine, et minimeerida risk ja tagada töötav lahendus, et ajalooline ja kultuuriväärtuslik hoone säilitada. See on ka kõikide, nii edukate kui ka mitte edukate, siamaani tehtud uuringute järelendus.

## 1.4 Eesmärgid

Töö peamisteks eesmärkideks on:

- Seespoolt soojustatud vahvarkseina soojus- ja niiskustehnilise toimivuse analüüs reaalsetes kliimatingimustes väliskatse abil
- Erinevate soojustuslahenduste soojus- ja niiskustehnilise toimivuse võrdlus ja analüüs:
  - Aurutihe PIR 50mm
  - Kaltsiumsilikaadil põhinev auru juhtiv kapillaaraktiivne soojustussüsteem 50mm
  - Soojustuskrohv EPSi graanulitega 50mm
- Arvutusmudelite täpsuse kontroll ja vajadusel nende täpsustamine ja kalibreerimine
- Vahvarkseina pikaajalise toimivuse kontroll modelleerimise teel, erinevate soojustuslahenduste korral

Töö hüpoteesid olid:

- PIR soojustuse puhul on sein soojustuse paigaldamise hetkel liiga niiske, et ta saaks välja kuivada ning suhteline niiskus soojustuse taga on liiga pikalt kõrge, mis põhjustab seal hallituse teket ja puidu mädanemist.
- CaSi puhul on seina ebaühtlase pinna tõttu paigaldus ebaühtlane ja raskendatud. Kuna seina hüdrofobiseerimine on meie olukorras välistatud, võib kaldvihma

poolne negatiivne mõju seinaga niiskuslikule toimivusele saada saatuslikuks. Kui soojustuse taga saab sein piisavalt välja kuivada, on lootust, et kriitilistes punktides hallituse ohtu ei teki.

- Termokrohvi puhul on soojustuse paigalduse paksus seinaga ebaühtluse tõttu varieeruv. Sarnaselt CaSi lahendusele võib saada kaldvihm seinaga toimivusele saatuslikuks. Kui soojustuse taga saab sein piisavalt välja kuivada, on lootust, et kriitilistes punktides hallituse ohtu ei teki. Lisaks on soojustusrohvil endal märgpaigalduse tõttu kõrge algniiskus, mille kuivamine võtab aega ja mis mõjutab seinaga soojus- ja niiskus tehnilist toimivust.

## 2 METOODIKA

### 2.1 Välikatse Keeni mõisas

Uuring viidi läbi kaheetapilisena ning uurimismeetodil lähtuti Paul Klõšeiko magistritööst „Seespoolse lisasoojustusega tellisseina soojus- ja niiskustehniline toimivus Kohtla-Järve koolimaja näitel“ (Klõšeiko, 2014) :

- Katseseina ehitus ja seespoolse soojustuslahenduste katseline mõõtmine tegelikes kliimatingimustes, materjaliomaduste määramine, katsetulemuste analüüs ja alusandmete kogumine arvutusmudeli kalibreerimiseks.
- Arvutusmudeli kalibreerimine, pikaajalise soojustuslahenduste soojus- ja niiskustehnilise toimivuse kontroll modelleerimise teel.



Joonis 2.1 Keeni mõis peale fassaadi renoveerimist (vasakul), Keeni mõis enne fassaadi renoveerimist (paremal)

#### 2.1.1 Uuritav seinakonstruktsioon ja soojustusmaterjalid

Esialgne soojustamata välissein oli 30-32cm paks, mis koosnes kahest tellisekihist ning 140..230x220..300mm puitsõrestikust, mis olid vahvärkseinale omaselt müüritise sisse raamiks paigaldatud ning mis olid tasa sisekihi pinnaga. (Joonis 2.2). Soojustuslahenduse tüübid ja paksused valiti eelnevalt teostatud uuringute ja soojustusmaterjalide omaduste ja toimivuse analüüsi tulemusel. Katseseinte hulka kuulus ka referentssein, kus lisasoojustust ei lisatud. Hoone välisseina viimistlus oli eelnevalt renoveeritud ning selle puutumine seega keelatud.

Kokku kasutati kolme erinevat soojustusmaterjali. (Joonis 2.3, Joonis 2.4, Joonis 2.5). Materjalide valiku puhul tuli võtta arvesse seinte olukorda, pidades silmas eelnevalt tehtud uuringutest õpitud infot. Nagu eelnevalt tehtud uuringutest selgus, on peamised

märksõnad välisfassaadi hüdrofobiseerimise olulisus, samuti oli ka oluline, et soojustatav sein oleks enne soojustuse paigaldamist kuiv. Kuna meie uurimise all oleva hoone puhul ei ole võimalik välisseina hüdrofobiseerimine ning hoone on seisnud pikalt külmana ning seinad on märjad ja niisked ja seinte väljakuivamine võtab aega, tuleb olla materjalide ja soojustuse lahenduste valiku juures eriti tähelepanelik ja kriitiline. Kindlasti ei tohi kasutada sellises olukorras soojustusmaterjalina märgpaigaldusega tselluvilla. Ka kuiva seina ja hüdrofobiseerimise puhul ei ole uuringud näitanud piisavalt usaldusväärset tulemust villa kasutamise puhul. (Arumägi et al., 2015) Antud uuring on küll tehtud ajaloolise puitseina kohta, kuid nagu ka eelnevalt on käsitletud, siis kõik eelnevad uuringud annavad meile mingit ettekujutust, mis lahendus meie olukorras võiks toimida ja milline mitte. Seega juba niiske seina puhul peaks olema märgpaigaldusega tselluvill kindlasti välistatud. Sellisel juhul on kondenseerumine, hallitus ja puidu mädanemine väga tõenäoline oht.

Üheks uurimise all olevaks soojustuslahenduseks on madala aurujuhtivusega polüisotsüanuraat plaat (PIR). Antud lahendus väldib siseõhu niiskuskooormuse tõttu toimuvat veeaurudifusiooni ja selle võimalikku kondenseerumist seinas. Küll aga pääseb niiskus tarindisse väljast poolt ning kaldvihma tõttu akumuleeruv niiskus esialgses tarindis, mis muidu oleks saanud siseõhku välja kuivada, kuid nüüd aurutiheda soojustuse tõttu seda teha ei saa. Sellise lahenduse puhul kui suhteline niiskus soojustuse taga ületab kriitilise piiri võib see põhjustada vahvarkseina puitosade hallitust ja/või mädanemist, kui aga niiskus saab piisavas mahus seinast välja kuivada ning ka seespoolne niiskuskooormus seina ei pääse, võib olla tegemist toimiva lahendusega.

Teiseks lähenemiseks on valitud vastupidiselt PIR-ile auru läbilaskev „kapillaaraktiivne lisasoojustuse“ lahendus. Sellisel juhul ei ole materjal aurutihe ning erinevalt aurutihedast soojustusest võimaldab kaldvihmast märgunud tarindil ka pärast soojustuse paigaldust siseruumi poole kuivada. Lisaks, tänu kõrgele kapillaarpoorsusele ja veejuhtivusele, jaotab soojustus esialgsele tarindile kondenseeruva vee soojustuse mahus ümber ning võimaldab sellel kuivematel perioodidel siseõhku kuivada. Sellisel juhul on seinal võimalik välja kuivada mitmes suunas, kuid seina pääseb ka seespoolne niiskuskooormus.

Kuna auru läbilaskev lahendus on niiske olemasoleva seina tõttu teoreetiliselt kindlam ning otseselt ei lukusta niiskust seina sisse, on valitud selle jaoks kaks erinevat lahenduse varianti. Termokrohvi näol on tegemist mineraalse kergrohviga, kus täitematerjaliks on kasutatud vahtpolüstüreeni graanuleid. EPS-i gaarnulid annavad krohvile kergema kaalu ja suurendavad tema soojapidavust. Soojustuskrohvi paigaldatakse kihi kaupa ning on võimalik saavutada 20-100mm paksusega soojustuskrohvi kiht. Just ebaühtlase seina peale on selline paigaldusviis lahendustest

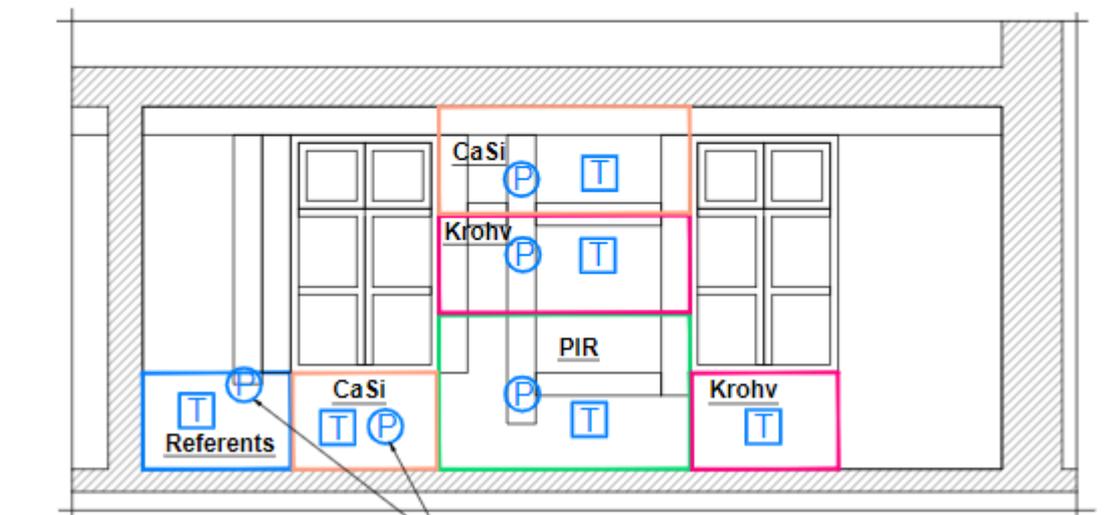
kõige mugavam ja kergem, kuid ebaühtlasest aluspinnast tulenevalt on ebaühtlane ka soojustuse enda paksus. Ka uuringud on näitanud, et kuigi termokrohvi soojapidavus ei ole nii hea kui tuntumad soojustusmaterjalid nagu PIR, EPS ja mineraalvill, siis soojuskrohv on niiskete ajalooliste hoonete puhul seespoolseks soojustamiseks üks usaldusväärsemaid lahendusi. Seda eeltoodud põhjustel, et ta on auru juhtiv soojustusmaterjal ning laseb niiskusel paremini ja mitmes suunas välja kuivada. Ka välikatsed ajalooliste kiviseinte peal on sarnast tulemust näitanud. (Walker & Pavía, 2018) Kaltsiumsilikaadist isolatsiooniplaadi puhul on tegemist väga kapillaaraktiivse materjaliga, mis on kõrge avatud poorsusega ja madala veeaurudifusioonitakistusega. See tähendab, et olles samal ajal soojusisolatsiooniks ja omades head soojapidavust, võimaldab ta sarnaselt termokrohvide suurtes kogustes niiskust imada ning uuesti välja anda, mis teoreetiliselt aitab ära hoida hallituse teket. Ka välikatsed ja pikaajalised simulatsioonid on näitanud CaSi kasutamist seespoolse soojustusena heaks ja töötavaks lahenduseks (Jensen et al., 2020; Klõšeiko, 2014). Küll aga on parimad tulemused juhtudel, kui seina välispind on hüdrofobiseeritud ning sarnaselt termokrohvide, ei ole CaSi plaadi soojapidavus sama hea kui tavapäraste soojustuslahenduste puhul. Samuti tuleb üle mainida, et iga välikatse puhul on tegemist individuaalse olukorraga ning iga olukord vajab iseseisvat uuringut ja analüüsi. Sellegipoolest on eelnevalt tehtud uuringud andnud põhjust meie olukorras kasutada üheks võimalikuks lahenduseks just CaSi-l põhinevat isolatsiooniplaati ja soojustussüsteemi.

Testseinte lõigud paigutati vastavalt, et oleks võimalik hinnata kaldvihma mõju erinevatel seina kõrgustel ning võrrelda soojustuslahenduse toimivust erinevates punktides. Kuna maja on seisnud külmana ning seinad niisked, on põhjust arvata, et materjali algniiskus on seina kõrgusest olenevalt erinev. Lisatud soojustusmaterjalid paigaldati vastavalt materjalitootja juhistele ning paigaldusel kasutati tootja poolt ette nähtud liimsegusid ja krohve.



Joonis 2.2 Vahvärkseina konstruktsioon Keeni mõisas

## VAADE SEEST



Joonis 2.3 Testseina erinevate soojustuslahenduste lõigud ja nende asukohad



Joonis 2.4 Paigaldatud soojustuslahendused testseinale, vastavalt joonisele Joonis 2.3

**Seinalõik 1 (PIR)** (*Therma TW50 Kiviseina plaat, s.a.*)

Suletud pooridega polüisotsüanuraatvahtplaat, madala soojuseri juhtivusega ja kõrge veeaurudifusioonitakistusega, seega töötab lisaks soojusisolatsioonile ka justkui aurutõke.

Toode: Kingspan Therma

Paigaldus: Toote paigaldus montaaživahuga, tehes kindlaks, et täidetakse kõik vuugid ja vahemikud. Soojustuse paksus 50mm

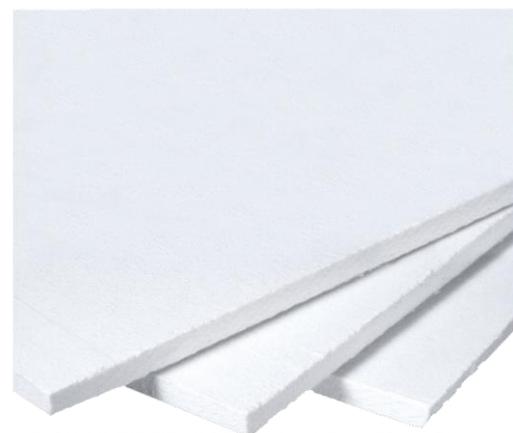


**Seinalõik 2 (CaSi)** (*epatherm\_etp.pdf, s.a.*)

Kaltsiumsilikaadil põhinev, auru juhtiv kapillaaraktiivne materjal, väga kõrge avatud poorsusega ja madala veeaurudifusioonitakistusega

Toode: Epasit Epatherm

Paigaldus: Soojustus paigaldatakse tasapinnaliselt liimitult, milleks kasutatakse spetsiaalset märgpaigaldusega liimkrohvi. Soojustuse paksus 50mm



### Seinalõik 3 (Soojustuskrohv) (TM\_weber.therm\_505\_HDP.pdf, s.a.)

Mineraalne kergkrohv, kus täitematerjaliks on kasutatud vahtpolüstüreeni (EPS) graanuleid läbimõõduga 2mm. Kapillaaraktiivne materjal madala veeaurudifusioonitakistusega.

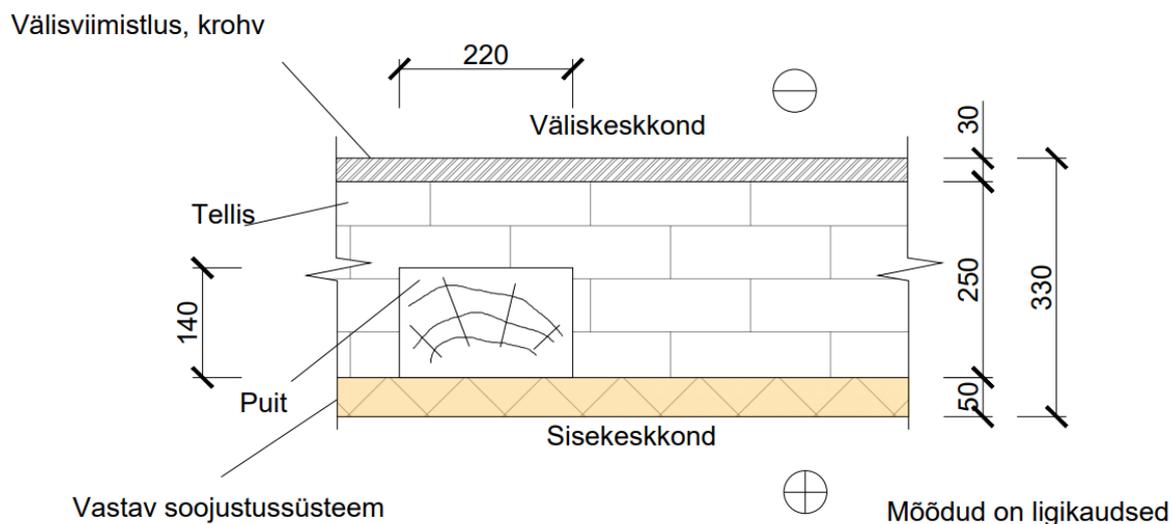
Toode: Weber.Therm 505

Paigaldus: Termokrohvi paigaldati mitmes kihis 1-2 cm kaupa. Soojustuse kogupaksus 50mm.



### Seinalõik 4 (Ref)

Soojustamata võrdlussein



Joonis 2.5 Olemasolev seinakonstruktsioon koos vastava soojustuslahendusega

### 2.1.2 Mõõteseadmed

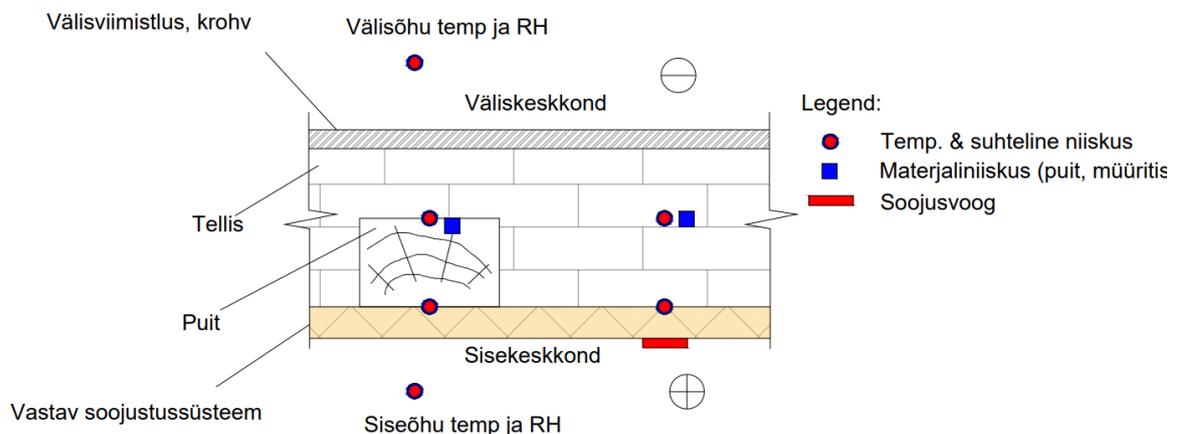
Igasse soojustatud testseina lõiku paigaldati mõõteandurid:

- Soojustuse ja seina vahele tellise lõikes: temperatuur ja suhteline niiskus
- Soojustuse ja seina vahele puidu lõikes: temperatuur ja suhteline niiskus
- Seina sisse puidu tagumise servaga tasa tellise lõikes: temperatuur, suhteline niiskus ja materjali niiskus

- Seina sisse puidu tagumise servaga tasa puidu lõikes: temperatuur, suhteline niiskus ja materjali niiskus
- Tellise lõikes piirdetarindi soojusvool, andur seina sisepinnal

Soojustamata seina paigaldati:

- Seina sisse puidu tagumise servaga tasa tellise lõikes: temperatuur, suhteline niiskus ja materjali niiskus
- Seina sisse puidu tagumise servaga tasa puidu lõikes: temperatuur, suhteline niiskus ja materjali niiskus
- Tellise lõikes piirdetarindi soojusvool, andur seina sisepinnal



Joonis 2.6 Andurite ja mõõteseadmete ligikaudne paiknemine testseinas

Lisaks seinas mõõdetavatele temperatuuri ja suhtelise niiskuse tasemetele ja materjalide niiskusele mõõdeti temperatuuri ja suhtelist niiskust testruumis ning hoone lähedal õues. Õue, hoone küljele, paigaldati ka ilmajaam.

Andmed salvestati firma Uniflex Systems OÜ poolt koostatud mõõtesüsteemi uniscada.

Uuringus kasutati järgnevaid andureid:

### **Temperatuur ja suhteline niiskus tarindis ning sise- ja väliskeskkonnas**

Toote nimetus: SHT35-DIS-B (AG, s.a.)

Mõõtepiirkond ja -täpsus: temperatuur  $-40...125 \pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

Suhteline niiskus  $0...100 \pm 1.5 \text{ \%RH}$

Mõõtepea läbimõõt: 6mm

### **Soojusvoog**

Toote nimetus: Hukseflux HFP01 (*HFP01 Heat Flux Plate, s.a.*)  
Mõõtepiirkond: -2000...+2000 W/m<sup>2</sup>, täpsus +5%/-5% (12 tunni summaarne)

### **Pinnatemperatuur**

Toote nimetus: Pt1000  
Mõõtepiirkond ja -täpsus: temperatuur -70...550 ±0.3°C

### **Pinnaseniiskus**

Toote nimetus: VH400 (*Soil Moisture Sensor - VH400, s.a.*)  
Mõõtepiirkond ja -täpsus: temperatuur -40...85  
Suhteline niiskus 0...100 ±2 %RH (25 °C juures)

### **Materjali niiskus**

Toote nimetus: Omnisense S-2 (*Omnisense S-2, 2024*)  
Mõõtepiirkond ja -täpsus: temperatuur ±0.3°C ;  
Suhteline niiskus 0...100 ±2 %RH

### **Andmesalvesti**

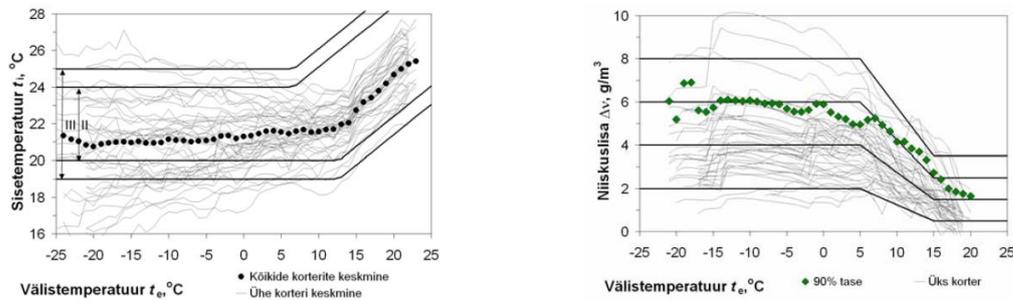
Toote nimetus: Squirrel SQ2020 1F8 (*Grant SQ2020-1F8, s.a.*)

### **Ilmajaam**

Toote nimetus: GW1101 Wi-Fi Weather Station Gateway (*GW1101 Wi-Fi Weather Station Gateway with Solar Powered 7-in-1 Outdoor, s.a.*)

## **2.1.3 Sisekliima**

Testruumis tekitati sisekliima sarnaselt uurimistöole „Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga“ esitatud sisekliima mõõtmiste tulemustele (vt Joonis 2.7), et jälgendada reaalselt Eesti sisekliimat. (Kalamees et al., 2010). Sisekliimat reguleeriti elektrikütteradiaatori ja niisutiga ning ventileeriti tuulutiga. Sisekliima reguleerimist juhiti keskse andmetalletus- ning kliimatagamissüsteemiga.



Joonis 2.7 Sisetemperatuuri (vasakul) ja niiskuslisa (paremal) sõltuvus välistemperatuurist Eesti telliskorterelamutes

Temperatuuri ja õhuniiskust ruumis juhiti vastavalt välisõhu temperatuurile ja etteantud seadesuurusele Joonis 2.7 järgi, kus on esitatud sisetemperatuuri sõltuvus välistemperatuurist (Joonis 2.7 vasak) ja niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist (Joonis 2.7 parem) Testruumi sisetemperatuuri seadeaarv oli 23°C.

## 2.2 Arvutuslik analüüs

### 2.2.1 Üldist

Selleks, et hinnata soojustuslahenduste toimivust paremini, ei piisa selle lühiajalisest jälgimisest andurite ja mõõteseadmetega. Pikaajalise toimivuse analüüsimiseks kasutati Delphin 6.1. arvutus- ja simulatsioonitarkvara, mis võtab arvesse muutuvat kliimat läbi aastate, materjaliomaduste keskkonnasõltuvust ja õige kalibreerimise korral annab usaldusväärse ettekujutuse lahenduste toimivusest pikemas perspektiivis, et anda lõplik hinnang parima lahenduse kohta. Piirdetarindi konstruktsiooni ning väga erinevate omadustega materjalide tõttu on tehtud Delphini simulatsioon 2D-s, et saada veel usaldusväärsem tulemus. (Roels & Tijssens, 2023, lk 1)

Selleks, et arvutusmudel oleks usaldusväärne ja jäljendaks võimalikult täpselt reaalselt olukorda, mõõdeti kõigepealt kõik kasutuses olevate materjalide tähtsamad omadused, kasutati mõõdetud välis- ja sisekliima parameetreid ning simuleeriti läbi mõõtmisperiood. Simulatsiooni tulemusi mõõtmisperioodist võrreldi reaalselt välikatsel mõõdetud tulemustega ning selle põhjal hinnati, kas mudel on usaldusväärne või vajab kalibreerimist. Peale mudeli paika häälestamist teostati pikaajaline simulatsioon, kus simuleeriti läbi 48 aastat ning saadi arvutustulemused seina seespoolse soojustamise

lahenduste toimivuse ja seina käitumise kohta. Analüüsi mõõtepunktides lisaks temperatuurile ja suhtelisele niiskusele ka hallitusmudeleid (Ojanen et al., 2010; Viitanen et al., 2011) ja puidu mädanikumudeleid (Viitanen et al., 2008), et hinnata vahvarkseina kõige kriitilisemat materjali, milleks on telliste vahele paigaldatud puit.

## 2.2.2 Programi Delphin tööpõhimõte

Arvutustarkvara Delphin 6 kasutab samu põhimõtteid, mis Delphin 5 tarkvara, seega tööpõhimõtte kirjeldus põhineb Delphin 5 kasutusjuhendil. (*Delphin 5 Help | Manualzz*, s.a.)

Protsessid arvutustarkvaras Delphin on modelleeritud läbi niiskuse-, õhu-, energia- ja ainebilansside antud tasakaaluvõrrandite, mis kirjeldavad vastavate voogude bilanssi erinevate arvutusmahtude kohta ja nende vahel. Ääritingimused kirjeldavad vooge ääremahude ja sise- ning väliskeskkonna vahel. Lisaks on antud talletuslike protsesside mudelid (adsorptsioon, desorptsioon ja vabanemine). Kuna sellistele kombineeritud mudelitele puuduvad analüütilised lahendid tuleb kasutada arvmeetodeid. Programmis Delphin kasutatakse diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks lõplike mahtude meetodit.

### Niiskuse üldine massibilanss:

$$\frac{\partial}{\partial t} W_{REV}^{m_w+v} = \frac{\partial}{\partial x} [g_{conv}^{m_w} + g_{conv}^{m_v} + g_{diff}^{m_w}] + \sigma_{REV}^{m_w+v} \quad (1)$$

Kus:

- $W_{REV}^{m_w+v}$  elementaarvaru niiskussisaldus (vedeliku ja veeaur,  $[kg/m^3]$ );
- $g_{conv}^{m_w}$  veevoog materjali poorides ja pooride pinnal (kapillaarne liikumine),  $[kg/m^2s]$ ;
- $g_{conv}^{m_v}$  veeauru konvektsioonivoog,  $[kg/m^2s]$ ;
- $g_{diff}^{m_w}$  veeauru difusioonivoog,  $[kg/m^2s]$ ;
- $\sigma_{REV}^{m_w+v}$  niiskuselisa/-kadu antud elementaarvarus,  $[kg/m^3s]$ .

### Vee liikumine kapillaarsel teel:

$$g_{conv}^{m_w} = c_l^{m_w} * g_{conv}^{m_l} \quad (2)$$

$$c_l^{m_w} = 1 \quad \text{tegur, mis määrab vee kontsentratsiooni vedelikus, [-];}$$

$$g_{conv}^{m_l} = -\delta_l(\Psi) \left[ \frac{\partial P_l}{\partial x} + (\rho_l g) \right] \quad (3)$$

Kus:

- $-\delta_l(\Psi)$  materjali vee-erijuhtivus,  $[kg/m * s * Pa]$ ;
- $P_l$  vee poorirõhk,  $[Pa]$ ;

- $\rho_l$  vedela vee tihedus, [ $kg/m^3$ ];
- $g$  gravitatsioonikonstant, [ $m/s^2$ ].

Seejuures saab poorirõhu arvutada Kelvini valemiga:

$$P_l = p_{sat}(T) + \frac{R \cdot T \cdot K \cdot \rho}{M_w} * \ln(RH) \quad (4)$$

Kus:

- $p_{sat}(T)$  veeauru küllastusrõhk, [ $Pa$ ];
- $T$  temperatuur, [ $^{\circ}K$ ].

### Veeauru liikumine konvektiivsel teel:

$$g_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} * g_{conv}^{m_g} \quad (5)$$

Kus  $c_g^{m_v}$  veeauru massi kontsentratsioon gaasis, [ $kg/kg$ ];

$$c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a + p_v} * \frac{R_a}{R_v} \quad (6)$$

Kus:

- $p_v$  veeauru osarõhk, [ $Pa$ ];
- $p_a$  õhurõhk, [ $Pa$ ];
- $R_a$  universaalne gaasikonstant, [ $J/(kg * K)$ ];
- $R_v$  veeauru gaasikonstant, [ $J/(kg * K)$ ];
- $g_{conv}^{m_v}$  konvektiivne veeauruvoog, [ $kg/(m^2s)$ ].

**Difusiooni teel liikuvat veeauru** saab täpsemate andmete puudumisel väljendada

kui:

$$g_{diff}^{m_w} = -\frac{D_a(T)}{\mu R_v T} f(\psi_g) \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (7)$$

Kus:

- $D_a(T)$  seisva õhu veeaurueri juhtivus, [ $m^2/s$ ];
- $\mu$  materjali veeauru difusioonitakistustegur, [-];
- $f(\psi_g)$  funktsioon gaasi mahust ruumalaühikus, [-];
- $\psi_g$  gaasi maht ruumalaühikus, [ $m^3/m^3$ ].

$$D_a = (22,2 + 0,14 * t) * 10^{-6} \quad (8)$$

Kus:

- $t$  temperatuur, [ $^{\circ}C$ ].

$$\psi_g = \psi_{por} - \psi_l \quad (9)$$

Kus:

- $\psi_{por}$  materjali poorsus, [ $m^3/m^3$ ];
- $\psi_l$  vee maht ruumalaühikus, [ $m^3/m^3$ ].

**Põhjalikumalt uuritud materjalide** puhul saab veeaurudifusioonivoo anda järgnevalt:

$$g_{diff}^{m_v} = -\delta_p(\psi) \left[ \frac{\partial p_v}{\partial x} \right] \quad (10)$$

Kus:

- $\delta_p(\psi)$  materjali veeauruerijuhtivus,  $[kg/m * s * Pa]$ ;
- $p_v$  veeauru osarõhk,  $[Pa]$ .

Kuna materjalide veejuhtivus sõltub oluliselt nende poorstruktuurist, on analüütilise lähenemise asemel lihtsam seda kirjeldada empiiriliste mõõtmistulemustega. Delphin programm kasutab laborimõõtmisel põhinevaid sorptsiooniniiskuse kõveraid, mille põhjal leitakse vastaval niiskussisaldustel kehtivad kapillaarse vee-erijuhtivuse ja veeauruerijuhtivuse väärtused. Põhjalikumalt uuritud materjalide puhul on antud erinevatel niiskussisaldustel mõõdetud erijuhtivustest koostatud graafikud. Sel juhul leitakse niiskusvood valemite (3) ja (10) abil. Kui materjalil puuduvad põhjalikud mõõtmisandmed, saab veeauru difusioonivoo arvutada lähtudes standardikohaselt mõõdetud difusioonitakistusest ( $\mu$ ) valemiga (7).

Summaarse niiskusvoo saab lähtudes eelnevatest valemitest lihtsustatud kujul anda järgnevalt:

$$g_{sum} = g_{l,conv}(RH, T, \psi) + g_{v,diff}(p_v, T, \psi) \quad (11)$$

### Energiabilanss

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = \frac{\partial}{\partial x} \left[ q_{diff}^Q + u_l * g_{conv}^{m_l} + u_g * g_{conv}^{m_g} + h_v * g_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} * g_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^U \quad (12)$$

Kus:

- $\rho_{REV}^U$  siseenergia tihedus elementaarmahus,  $[J/m^3]$ ;
- $q_{diff}^Q$  soojusvoog,  $[W/m^2]$ ;
- $u_l(T)$  vee erisiseenergia,  $[J/kg]$ ;
- $g_{conv}^{m_l}$  konvektiivne veevoog,  $[kg/(m^2 * s)]$ ;
- $u_g(T)$  gaasi eri siseenergia,  $[J/kg]$ ;
- $g_{conv}^{m_g}$  gaasikonvektsioonivoog,  $[kg/(m^2 * s)]$ ;
- $h_v(T)$  erientalpia veeauru jaoks,  $[J/kg]$ ;
- $g_{diff}^{m_v}$  veeaurudifusioonivoog,  $[kg/(m^2 * s)]$ ;
- $h_{voc,g}(T)$  lenduvate orgaaniliste osakeste erientalpia,  $[J/kg]$ ;
- $g_{diff}^{m_{voc,g}}$  lenduvate orgaaniliste osakeste difusioonivoog,  $[kg/(m^2 * s)]$ ;
- $\sigma_{REV}^U$  energiakaod/-lisad antud elementaarmahus,  $[W/(m^3 * s)]$ .

$$q_{diff}^Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (13)$$

Kus:

- $\lambda$  materjali soojuseri juhtivus,  $[W/(m * K)]$ ;
- $T$  temperatuur,  $[K]$ .

### 2.2.3 Mõõdetud ja kasutatavad materjaliandmed

Simulatsioonides kasutatud materjalid on valitud programmi Delphin materjali andmebaasist vastavalt testseina ehitamisel kasutatavate materjalide tootjate esitatud soojus- ja niiskustehnilistele materjaliomadustele võimalikult sarnased materjalid. Olemasoleva seina puhul võeti tellistest katsekehad ning määrati vajalikud materjaliomadused ning mudelisse on valitud programmi Delphin andmebaasist võimalikult sarnane tellise materjal.

Telliste valiku puhul lähtuti katsetulemustest saadud materjaliomadustest. Otsiti võimalikult sarnaste omadustega vastet. Kuna täpset vastet ei olnud võimalik leida tehti simulatsioonid läbi katsetulemustele kõige sarnasemate omadustega kahe tellise materjaliga. Valituks said tellised Brick MZ18 (ID1782) ja Normal Brick (ID512). Eesmärk oli analüüsida, kui suurt rolli valitud tellise materjal tulemuste juures mängib. Kuna esmaste mudelite analüüsist oli näha, et realselt mõõdetud tulemuste puhul soojustab tellis seina paremini kui simulatsioonides, muudeti tellise materjalifailides, tema soojuseri juhtivust vastavalt katsekehadelt saadud tulemusele  $\lambda=0.43 \text{ W}/(m * K)$ , et saavutada mudelite ja mõõtmistulemuste vahel parem ühtivus.

Katsekehade omaduste analüüsist selgus ka, et seinas esineb keskmisele tellisele täiesti erinevate omadustega telliseid, seega esialgsetes mudelites on läbi analüüsitud ka n.ö eriline tellis Old Building Brick Persiusspeicher (ID536).

CaSi materjal on Delphinis valitud vastavalt läbiviidud uuringule (Klõšeiko et al., 2023), kus uuriti erinevate Delphini materjalide käitumist simulatsioonis võrreldes seda materjali reaalse käitumisega. Uurimusest tuli välja, et osad Delphini andmebaasis olevad materjalid ei käitu simulatsioonides ja päris elus samamoodi. Uurimuse põhjal on valitud Delphin andmebaasist CaSi materjal ID koodiga 1780, materjalifail oli loodud seoses eelneva uuringuga, mille omadusi oli vastavalt CCR testile muudetud ning mis näitasid tehtud uuringus oluliselt paremaid tulemusi kui originaalsed Delphini andmebaasis leiduvad materjalifailid.

Sama uuringu põhjal on valitud ka simulatsioonides kasutatud puidu materjal. Kõige parema tulemuse ja reaalse elu jäljenduse andis samuti mitte Delphini andmebaasi originaalmaterjali fail, vaid spetsiaalselt muudetud puidu fail, kus vähendati materjali vee ja veeauru liikumise võimet materjalis.

Termokrohvina on kasutatud kahte erinevat EPS graanulite baasil olevat materjalifaili. Üheks neist on maxit Therm 75 (ID704) soojustusrohvi materjalifail, mis on paberite järgi sama materjal, mida on kasutatud ka meie katseseinte ehitusel ning võrdluseks on kasutatud ka Hydroment Transputz WDS (ID429).

Väliskihis viimistluskihina on mudelis kasutatud tavalist viimistlusrohvi Lime plaster (ID629).

Materjalide valik on tehtud järgnevate omaduste põhjal:

- Tihedus [kg/m<sup>3</sup>]
- Poorsus [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- Veeaurudifusioonitakistustegur [–]
- Soojuserijuhtivus [W/m \* K]
- Veeimavuskiirus [kg/m<sup>3</sup> \* s<sup>0.5</sup>]
- Vaakumküllastus [kg/m<sup>3</sup>]

Omadus	Soojustusmaterjalid			
	PIR	CaSi	Termokrohv (704)	Termokrohv (429)
Kuivtihedus kg/m <sup>3</sup>	32	187	227	196
Soojuserijuhtivus λ, W/(m*K)	0.02	0.059	0.058	0.059
Poorsus, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.949	0.929	0.914	0.926
Veeaurudifusioonitakistus-tegur, μ, -	60	3	28	10
Veeimavus, A <sub>wr</sub> , kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )	1.0*10 <sup>-7</sup>	0.85	0.008	0.017
Vaakumküllastus kg/m <sup>3</sup>	949	929	301	273

Tabel 2.1 Simulatsioonides kasutatud soojustusmaterjalide materjalide soojus- ja niiskustehnilised omadused

Omadus	Mõõdetud tellise omadused		Soojustatava seinä materjalid				
	Keskmine tellis	Eiline tellis	Viimistlus-krohv	Tellis (1782)	Tellis (512)	Tellis (536)	Puit
Kuivtihedus kg/m <sup>3</sup>	1680	1954	1498	1679	1786	2015	410
Soojuseri juhtivus $\lambda$ , W/(m*K)	0.48	0.94	0.412	0.43	0.43	0.87	0.098
Poorsus, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.38	0.37	0.435	0.366	0.354	0.24	0.678
Veeaurudifusioonitakistus-tegur, $\mu$ ,	59	109	9.26	24	18	140	500
Veeimavus, $A_w$ , kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )	0.24	0.19	0.019	0.18	0.2	0.046	0.0024
Vaakumküllastus kg/m <sup>3</sup>	366	225	430	330	319	225	678

Tabel 2.2 Simulatsioonides kasutatud soojustatava seinä materjalide soojus- ja niiskustehnilised omadused

## 2.2.4 Arvutusmudel

### Ülesehitus

Arvutusmudelid on koostatud vastavalt seinä avamisel ja katseseinä rajamisel saadud infost. Simulatsioonid on läbi viidud 2D mudelis, kus sisestatud konstruktsioon on tükeldatud erinevate mõõtudega elementaarmahtudeks selliselt, et suuremad mahud asuvad konstruktsiooni osade keskmises osas ning väiksemad mahud erinevate konstruktsiooniosade kokkupuutepindade lähedal ning nurkades. Joonis 2.8 on näha arvutusmudeli näitliku skeemi ja kriitiliste mõõtepunktide asukohtasid. Igaie seinätüübile on vastavalt lahendusele ja soojustusmaterjalide tootjate paigaldusjuhenditele lisatud vastavad soojustussüsteemi elemendid. Lisaks on väliskihiks lisatud 30mm tavalist viimistlus-krohvi, mis imiteerib fassaadiviimistlust.

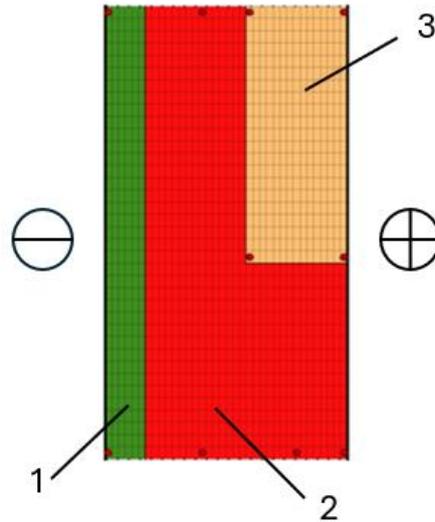
Sisepinna soojustakistuseks on arvestatud  $R_{si}=0.25$  m<sup>2</sup>K/W, veeauru difusioonitakistuseks  $1 \cdot 10^{-8}$  s/m, välispinna soojustakistuseks on võetud  $R_{se}=0.04$  m<sup>2</sup>K/W ja veeauru difusioonitakistus  $1 \cdot 10^{-8}$  s/m.

Kõik mudelid olid 2-mõõtmelised, arvesse ei võetud kihtide omavahelist ebataasasust, seinä konstruktsiooni materjalide võimalikku heterogeensust, konstruktsioonis esinevaid võimalikke õhulekkeid, materjalide deformatsioone, materjalide soojusjuhtivuse temperatuurisõltuvust, materjalide vananemise mõju.

Algniiskus valiti vastavalt katsekehade mõõdetud niiskussaldustele, tellise algniiskus kihiliselt.

### Välisääretingimused:

- Soojusülekanne (T, tuul)
- Veeaurudifusioon (T, RH, tuul)
- Lühiajaline soojuskiirgus (otsene ja hajuskiirgus)
- Standardne vihmamudel (T, RH, vihm, tuul)
- Lühilianeline soojuskiirgus (Ainult pikaajalises mudelis)



### Siseääretingimused:

- Soojusülekanne (T, tuul)
- Veeaurudifusioon (T, RH)

### Tähtsamad punktid analüüsimiseks:

- Tellise lõikes: välis- ja sisepind, tellise sees 2 punkti, soojustuse taga
- Puidu lõikes: välis- ja sisepind, tellise sees, puidu keskel ja puidu servas nii soojustuse taga kui ka puidu taga

Joonis 2.8 Arvutusmudeli näitlik skeem koos mõõtepunktide asukohtadega. Vastavalt soojustuslahendusele lisandub toa poolele vastav soojustusüsteem. 1 – Välisviimistlus/krohv; 2 – Tellis; 3 – puit

### Arvutusmudeli väliskliima

Võrdlusarvutused mõõtmisperioodi kohta on tehtud testruumis ja hoonest väljas mõõdetud temperatuuri ja suhtelise niiskusega. Lisaks oli paigutatud hoone kõrvale ilmajaam, mis andis meile andmed sademete hulga, tuule suuna ja kiiruse kohta.

Pärast arvutusmudeli võrdlust realselt mõõdetud tulemustega ning selle kalibreerimist ja paika sättimist kasutati varem mõõdetud väliskliimat. Kasutatud kliima oli Tõraveres, Eestis mõõdetud laiapõhjaline kliimaanalüüs 48 aasta jooksul vahemikus 06.1970-06.2018, kus on infot õhu temperatuuri, suhtelise niiskuse, tuule kiiruse ja suuna ja kaldvihma kohta, mida kõike võeti simulatsioonis arvesse.

## Arvutusmudeli sisekliima

Arvutusmudelis lähtuti sisekliima sõltuvusest väliskliimast sarnaselt punktis 2.1.3 kirjeldatud juhtimisloogikale, põhinedes uurimistöös „Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ja prognoositav eluiga“ esitatud sisekliima mõõtmiste tulemustele (vt Joonis 2.7) siseõhu temperatuuri leidmiseks kasutati valemit (14) ja siseõhu niiskulisa leidmiseks valemit (15). Valemeid rakendati eelneva 24 tunni keskmise välisõhu temperatuuri ja absoluutse niiskuse suhtes.

Funktsioon siiseõhu temperatuuri leidmiseks:

$$T_s = \begin{cases} 0.0267 * T_v + 21.167 & \text{kui } T_v \leq 12.5^\circ\text{C} \\ 0.4 * T_v + 16.5 & \text{kui } T_v > 12.5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (14)$$

Kus:

- $T_s$  siseõhu temperatuur, [ $^\circ\text{C}$ ];
- $T_v$  välisõhu temperatuur, [ $^\circ\text{C}$ ].

Funktsioon siseõhu absoluutse niiskuse leidmiseks:

$$v_s = \begin{cases} v_v + \Delta v_{5^\circ\text{C}} & \text{kui } T_v \leq 5^\circ\text{C} \\ v_v + \frac{T_v - 5^\circ\text{C}}{20^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C}} * \left( \Delta v_{gr} - \frac{\Delta v_{5^\circ\text{C}}}{2} + 1 \frac{g}{m^3} \right) & \text{kui } 5^\circ\text{C} < T_v < -20^\circ\text{C} \\ v_v + \frac{\Delta v_{5^\circ\text{C}}}{2} - 1 \frac{g}{m^3} & \text{kui } T_v \geq 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (15)$$

Kus:

- $v_s$  siseõhu veeaurusisaldus, [ $\frac{g}{m^3}$ ];
- $v_v$  niiskulisa veeaurusisaldus, [ $\frac{g}{m^3}$ ];
- $\Delta v_{5^\circ\text{C}}$  niiskulisa välisõhu temperatuuril  $T_v \leq 5^\circ\text{C}$ , [ $\frac{g}{m^3}$ ].

Lühiajalises simulatsioonis lähtuti mõõdetud siseruumi suhtelisest niiskusest, kus algselt niisutite niiskukoormus vahetus.

Pikaajalises arvutusmudelis valiti niiskukoormus vastaval niiskusklass 2-le ja klass 1-le:

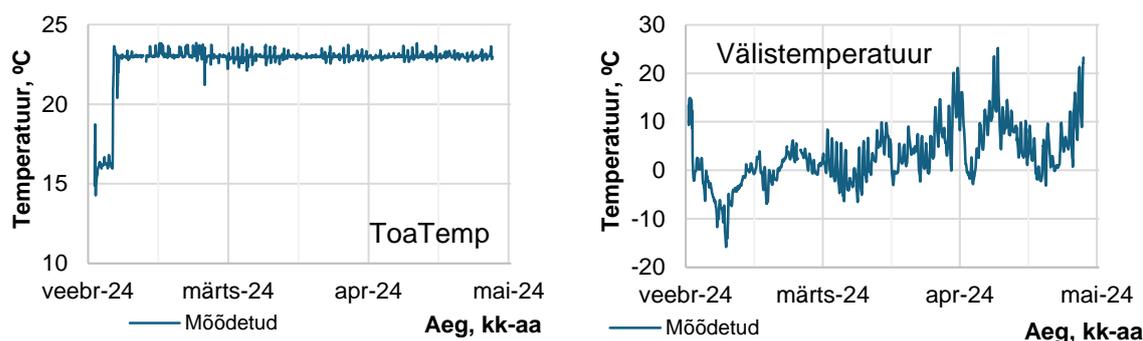
Klass 2:  $\Delta v + 4 \text{ g/m}^3$

Klass 1:  $\Delta v + 2 \text{ g/m}^3$

## 3 MÕÕTMISTULEMUSED

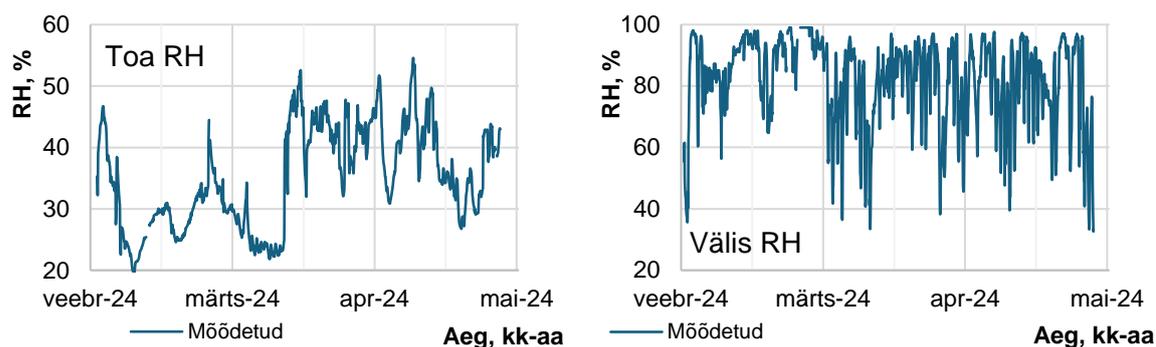
### 3.1 Kliimatingimused

Esialgne mõõteperiood, mille põhjal on tehtud esialgne mudelite analüüs ja nende kalibreerimine, oli 3 kuud. Mõõteperioodiks oli veebruar 2024 – mai 2024. Mõõdetud sise- ja välistemperatuurid on antud Joonis 3.1.



Joonis 3.1 Mõõdetud sisetemperatuur (vasak) ja mõõdetud välistemperatuur (parem)

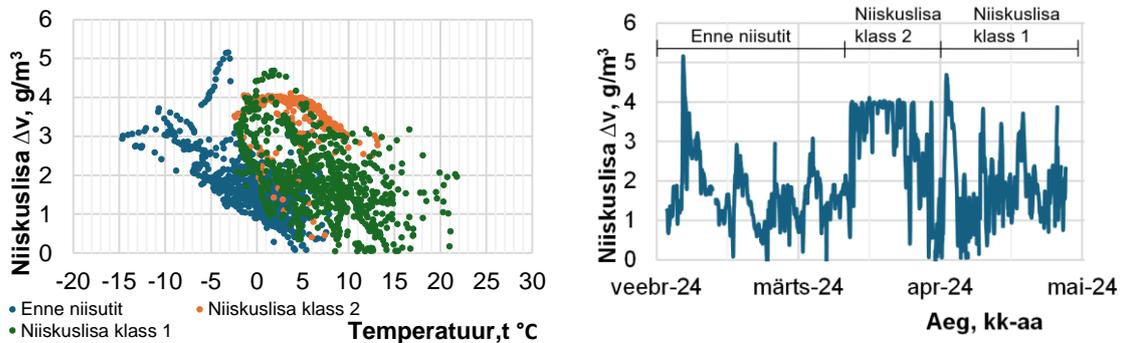
Jooniselt (Joonis 3.1, vasak) on näha, kui ruumis küte sisse on lülitatud, ruumi on stabiilselt köetud ning on suudetud hoida temperatuur stabiilselt 23 kraadi läheduses. Välistemperatuuri puhul (Joonis 3.1, parem) oli veebruari kuus näha 15 kraadist külma ja aprilli kuus üle 15 kraadist sooja, märtsi kuus miinus ja plusskraadide vahelist varieeruvust.



Joonis 3.2 Mõõdetud suhteline niiskus toas (vasakul). Mõõdetud suhteline niiskus väljas (paremal)

Nagu kajastab Joonis 3.2 (parem), siis mõõdetud suhteline niiskus väljas suuresti sõltub õues olevast ilmast ning varieerub palju. Toas, peale katseseinte valmis ehitamist,

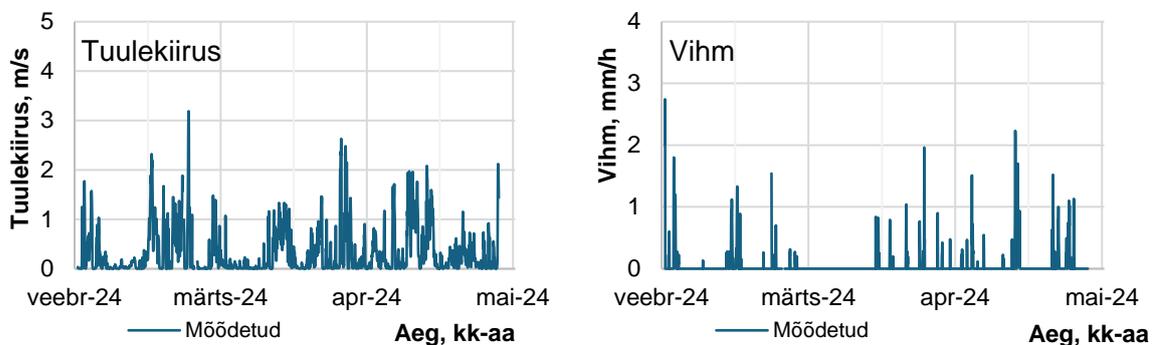
kohevalt niisuteid sisse ei lülitatud, kuna tuli oodata, et märgpaigaldusega soojustused saaksid välja kuivada. Seetõttu on ka näha (Joonis 3.2, vasak), et toas mõõdetud suhteline niiskus püsis esimesed 1.5 kuud madal ning seejärel on järsult tõusnud.



Joonis 3.3 Niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist (vasakul), niiskuslisa sõltuvus ajast (paremal).

Joonis 3.3 on näha niiskuslisa sõltuvust temperatuurist (vasak) ja niiskuslisa sõltuvust ajast (parem). Joonistelt on näha, et niisutid lülitati sisse märtsi keskel 4 g/m<sup>3</sup> peale, senikaua oli ruumis ruumi enda niiskuskoormus. Märtsi lõpus aga muudeti niiskuslisa klassi madalamaks ja niisutid olid lülitatud 2 g/m<sup>3</sup> peale. Ka Joonis 3.2 (vasak) pealt on näha, et märtsi teises pooles on tõusnud suhtelise niiskuse tase siseruumis. Küll aga on graafikult näha, et niiskuslisa klass 1 korral on niiskuslisa väärtused kaootilised, see on seetõttu, et niiskuslisa sõltub välistemperatuurist ning väljas läksid temperatuurid soojemaks, mis põhjustas niiskuslisa sellise kaootilisuse.

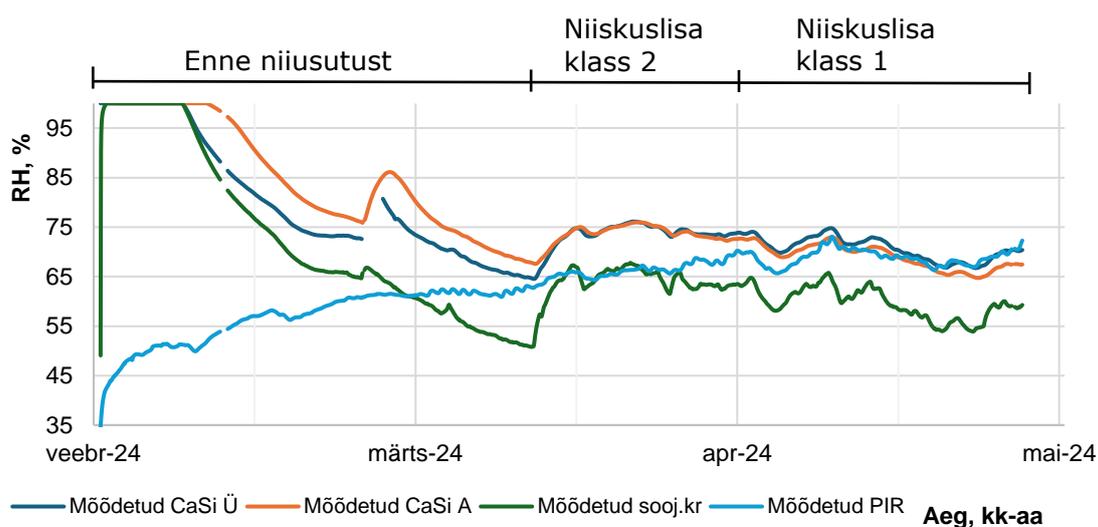
Lisaks on näha kliimajaamaga mõõteperioodil mõõdetud tuulekiirust (Joonis 3.4, vasak) ning vihma (Joonis 3.4, parem).



Joonis 3.4 Mõõdetud tuulekiirus (vasak) ja vihm (parem)

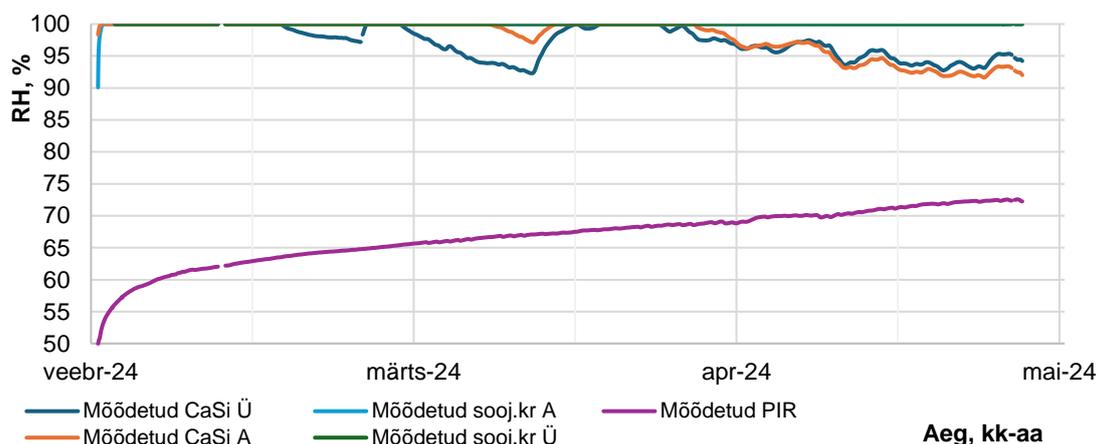
### 3.2 Materjalide reageerimine kliimatingimuste muutustele – suhteline niiskus ja temperatuur soojustuse ja esialgse seina vahel

Joonis 3.5 näeme soojustuse ja esialgse seina vahel mõõdetud suhtelist niiskust puidu lõikes kõigi soojustuslahenduste puhul. Selgelt on näha CaSi ja soojustuskrohvi väljakuivamisperioodi ning hetke, mil niisutid sisse lülitati. Kuna niiskust juhtivate soojustussüsteemide puhul on niiskuse levik mõlema poolne, siis toa poolne niiskuskoormus mõjutab soojustuse ja esialgse seina vahel olevat suhtelise niiskuse taset. Seega soojustussüsteemid töötavad täpselt nii nagu nad peaksid. Märkpaigalduse tõttu on CaSi ja soojustuskrohvi puhul algselt suhteline niiskus 100% peal. CaSi puhul on näha, kuidas väljakuivamise käigus ülemise ja alumise katseseina osa mõõdetulemused ühtlustuvad. Puidu lõikes on ka näha, et soojustuskrohvi puhul on välja kuivamine kiirem ja intensiivsem kui CaSi puhul. See võib olla seetõttu, et soojustuskrohv jaotab niiskuse tarindis paremini laiali kui seda teeb CaSi plaat. PIR-i puhul ei ole mingisugust väljakuivamist ega niiskuskoormuse kasvu mõju näha. Kuna tegemist on aurutiheda soojustusega, siis on see ka oodatud tulemus. Lisaks ei ole PIR soojustuse puhul tegemist märkpaigaldusega, seega sellest tulenevat niiskuse väljakuivamist ei toimu. Lisaks näeme PIR-i puhul stabiilset suhtelise niiskuse kasvu. Pikaajalises simulatsioonis on näha kas ja millal see kasv peatub ja kas see saab kriitiliseks.



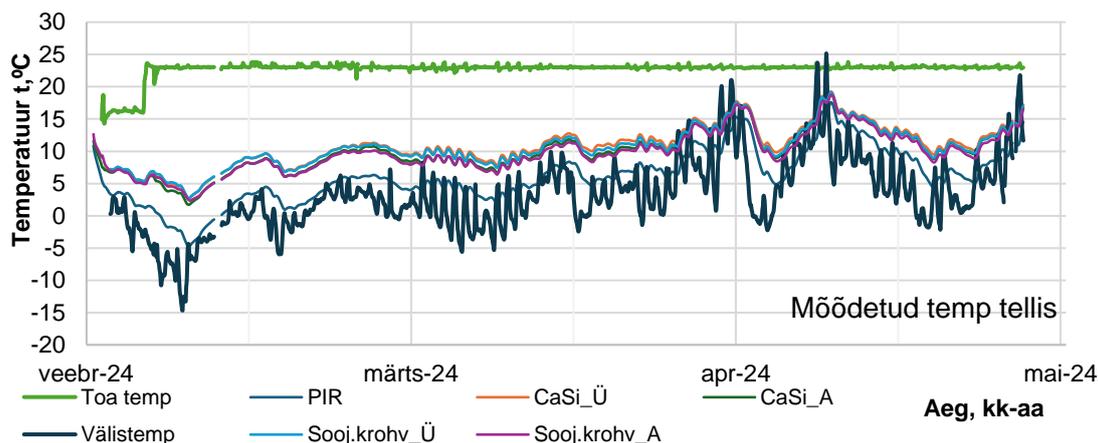
Joonis 3.5 Soojustuse taga mõõdetud RH puidu lõikes

Sama ei saa öelda tellise lõikes olevate mõõtmistulemuste kohta. Kui PIR töötab sarnaselt nagu ta tegi puidu lõikes, siis Joonis 3.6 on näha, et tellise lõikes soojustuskrohvi puhul mingit väljakuivamist näha ei ole ja suhtelise niiskuse tase püsib stabiilselt 100% peal. Kuna puidu lõikes on siiski välja kuivamist näha, siis on võimalik, et soojustuskrohvi taga tellise lõikes olev andur on riknenud ning ei anna õigeid tulemusi. CaSi puhul on näha minimaalset välja kuivamist, kuid võrreldes seda sama soojustuse puidu lõikega, siis need omavahel kokku ei lähe. Välja kuivamine on alanud hiljem ja toimub palju aeglasemini kui puidu lõikes. Ilmselt on tarindis tellise lõikes materjalid omavahel tihedalt koos ning õhkvahesid vähem kui puidu lõikes. PIR puhul näeme, et tellise lõikes on PIRi taga suhteline niiskus stabiilsem ja väiksema võnkumisega kui puidu lõikes. Selle peamiseks põhjuseks on puidu ümbruses olevad praod ja vuugid.



Joonis 3.6 Soojustuse taga mõõdetud RH tellise lõikes

Joonis 3.7 näeme temperatuuri soojustuse ja esialgse seina vahel tellise lõikes, lisaks on näha mõõdetud välis- ja sisetemperatuuri.



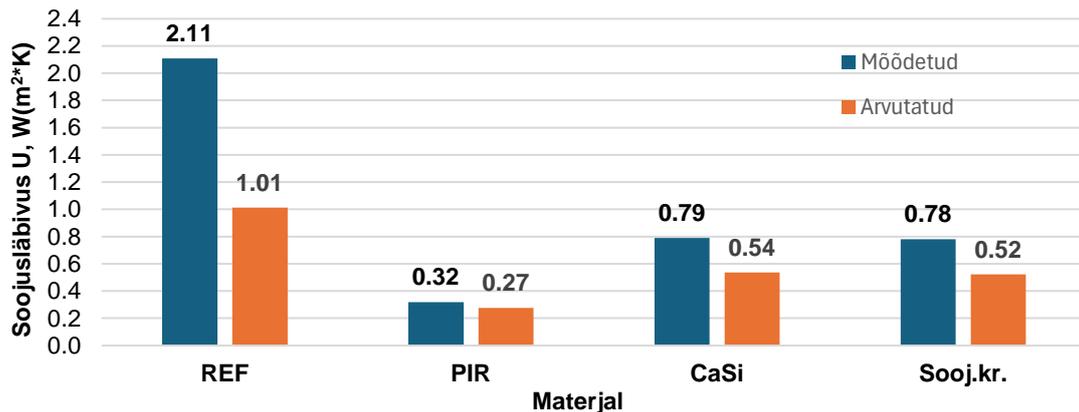
Joonis 3.7 mõõdetud temperatuurid soojustuse ja esialgse seina vahel tellise löikes, lisaks mõõdetud sise- ja välistemperatuur

Kui vaatame lähemalt soojustuse ja esialgse seina vahelises kihis toimuvat, on selgelt näha, kuidas CaSi ja soojustuskrohvi puhul on temperatuurid väga sarnased, kuid PIR-i puhul silmnähtavalt madalamad. Selle põhjuseks on PIR-i paremad soojustusomadused. Kui kõikide materjalide paksused on 50mm juures samad, siis soojuseri juhtivused kajastavad sarnast mustrit mida on näha temperatuuride varieeruvuse juures esialgse seina ja soojustuse vahel olevas kihis. Tabel 2.1

on näha, et  $\lambda_{PIR} = 0.022 \text{ W}/(m * K)$ ,  $\lambda_{CaSi} = 0.056 \text{ W}/(m * K)$  ja  $\lambda_{sooj.kr} = 0.059 \text{ W}/(m * K)$ , seega antud erinevus temperatuurides soojustuse ja esialgse seina vahel tuleneb puhtalt soojuseri juhtivuse erinevustest.

### 3.3 Soojuslähivus ja pinnatemperatuur

Mõõtmisperioodil olid seintele paigaldatud ka soojusvoo andurid, millega on võimalik välja arvutada seinalõikudes keskmised soojuslähivuse väärtused. Andurid olid paigaldatud seinte tellise löigetesse. Küll aga oli anduritelt info kätte saamisega probleeme ning külmema mõõtmisperioodi lõpuks saadi tulemused välja arvutada ainult referents ja PIR seina puhul. PIR ja referentsseina soojuslähivuse arvutamiseks on mõõteperioodist valitud külmem periood, millega saadakse usaldusväärsemad tulemused. CaSi ja soojustuskrohvi puhul on valitud pilves periood, kus päike ei paistnud. Kuna sama aja kohta ka PIR ja referentsseina soojuslähivused kattusid külma perioodi omadega, siis võib neid pidada usaldusväärseks.



Joonis 3.8 Seinalõikude mõõdetud keskmised soojuslähivused

Joonis 3.8 on näha, kuidas PIR seinalõigu puhul väheneb seina soojuslähivus üle kuue korra. CaSi ja soojustusrohvi puhul aga vähem kui kolm korda. Kuigi CaSi ja soojustusrohvi puhul siiski seina soojapidavus paraneb suurel määral, ei saa öelda, et sein, mille  $U=0.79 \text{ W/m}^2\text{K}$  on hästi soojapidav sein.

Joonis 3.8 on näha ka arvutatud soojuslähivusi ning kohe hakkab silma, et referentsseina puhul on arvutusmudelist saadud ja katseseinalt mõõdetud soojuslähivuse erinevus kahe kordne. Ka soojustuste puhul näitab mudel paremaid tulemusi, kuid erinevus nii suur ei ole. Kui lähtuda referentsseina mudeldatud soojuslähivusest siis soojustamine vähendas tarindi soojuslähivust ja tõstis soojustakistust 1.9...3.8 kordselt.

### 3.4 Mõõtmistulemuste hindamine ja analüüs

#### Katsetulemuste mõjutajad

Kuna tegemist on välimõõtmistega, siis on palju asjaolusid ja faktoreid, mis mõjutavad katsetulemusi ning nende täpsust.

Andurid olid paigaldatud iga soojustuslahenduse võimalikult keskele, et minimaliseerida võimalikku niiskus- ja soojusvoogude mõju seinalõikude servades ja erinevate soojustuslahenduste vahel.

Kuna olemasolev konstruktsioon koosneb ebaühtlase laotud tellistest ning puitkarkassist, oli soojustuse paigaldamisel pind väga ebaühtlane. Kuigi suuremad ebaühtlused lihviti ja lõhuti ühtlaseks nii palju kui võimalik, jäid siiski märkimisväärsed erinevused ja konarused alusseinale sisse. Seetõttu jäid soojustusplaatide paigaldamisel (PIR ja CaSi) seina ja soojustuse vahele ebaühtlase paksusega mördi või õhu kiht ning soojustusrohvi ise jäi ebaühtlase paksusega ning ei olnud võimalik teda ühtlaselt igale poole täpselt 50mm paigaldada.

Veel üks asjaolu, mis mõjutab samade mõõtepunktide võrdlust erinevate soojustuslahenduste juures, on olemasoleva konstruktsiooni heterogeensus. Materjalomadusi laboris uurides selgus, et seinas kasutatud telliste omadused varieeruvad seinast seinale, samuti on puitkarkassi paksus seinas ja meie andurite lõigetes erinev. See kõik mõjutab ka mingil määral mõõtmisandmete analüüsi ja selle täpsust.

Andurid on paigaldatud seinale käsitsi ning kui olemasoleva seinale peale on võimalik neid ühtlaselt ja üheselt mõistetavalt paigutada, siis seinale sees olevate andurite asukohta ja seisumääratlemine on palju kaootilisem ja vähem usaldusväärne. Andurid ei ole erinevates lõigetes samal sügavusel, samuti võib ühel anduril olla ümberringi tihe keskkond ja teisel anduril õhkvahe või vuuk, kus õhk vabalt liikuda saab.

Ka ilmajaamaga kaasnevad probleemid, erinevate rikete tõttu ei eksisteeri mõõtmisandmeid iga hetke kohta, samuti vihma mõõtmine võib anda lume kuhjumise tõttu valeandmeid, mis tuleb käsitsi välja selekteerida, mis samuti vähendab mõõtmistulemuste täpsust. Vaadates mõõdetud toatemperatuuri, siis ka küttesüsteem ei ole ideaalne. Sisetemperatuur kõigub ühe kraadi ulatuses üles-alla, seega ei ole täpselt tagatud sisetemperatuur, mis on seadearvuks valitud ning siseõhu temperatuuri stabiilsus võiks olla parem. Lisaks võib arvata, et eelnevalt loetletud probleemide tõttu on mingil määral häiritud ka niisutussüsteemi töö.

## **Tulemused**

Katseseinas soojustuse taga on selget erinevust näha PIR ja teiste soojustuslahenduste vahel. Nagu näitavad ka soojustusmaterjalide omadused, siis PIR-il on soojuserijuhtivus rohkem kui kaks korda parem kui seda on soojustuskorhvil ja CaSi plaadil. PIR katseseina puhul on just seetõttu temperatuurid tunduvalt madalamad ning kui välistemperatuur alla  $-10^{\circ}\text{C}$  langes, siis külmus läbi ka PIRi taga olev olemasolev konstruktsioon. Teiste soojustuste puhul ja ka referentsseina puhul seinale läbikülmumist soojustuse taga ei toimu. See juba näitab kuidas seinale olukord soojustuse tõttu muutub, kuna ilma soojustamata olukorras sellist läbikülmumist ei toimu.

Suhtelise niiskuse puhul on näha PIR-i puhul, et alates soojustuse paigaldamisest on soojustuse taga suhteline niiskus stabiilselt tõusnud. See oli ka oodatud, kuna seinale olev niiskus PIR-i aurutõkestavate omaduste tõttu toa poole välja kuivada ei saa, kuid küsimus seisneb selles, kui kaua ja kui kõrgele suhtelise niiskuse tase tõuseb. Teiste soojustuste puhul oli tegemist märgpaigaldusega, mistõttu algselt oli suhteline niiskus 100% ning algas konstruktsiooni välja kuivamine. Huvitaval kombel on väljakuvamine palju kiirem puidu lõigetes, kui mõlema soojustuse tellise lõigetes on suhteline niiskus püsinud stabiilselt 100% peal ja välja kuivamine alanud hiljem ja aeglasemini. Soojustuskrohvi lõikes võib olla tegemist RH-andurite rikkega. CaSi taga on ilmselt

puidu lõikes materjalide olukord soodsam välja kuivamisele kui tellise lõikes, kus võib olla, et kihid on tihedamad ja seetõttu ka väljakuivamine aeglasem. Kui võrrelda CaSi ja soojustuskrohvi RH-taset, siis soojustuskrohvi puhul on suhtelise niiskuse tase madalam, mis näitab, et ta on paremini niiskuse konstruktsioonis laiali jaotanud, nagu ta ka tegema peaks. Soojustuskrohvi paigaldus on otse olemasoleva seina peal ning niiskuse liikumine seega kergem kui CaSi puhul, kus CaSi plaadi ja seina vahel on erineva paksusega mördi kiht. Peale 1.5 kuud väljakuivamis aega lülitati sisse niisutid, mille peale hakkasid aurujuhtivates soojustuslahendustes suhtelised niiskused taas tõusma. PIR-i puhul peale niisutite sisse lülitamist erinevust näha ei ole, nagu ka arvata oli, sest toapoolne niiskus läbi PIR-i seina ei pääse.

### **Soojuslähivus**

Üheks peamiseks vanade hoonete lisasoojustustamise põhjusteks on tarindi muutmine energiatõhusamaks ja soojusliku mugavuse suurendamine ja parandamine. Tarind ise laseb vähem soojust läbi ja toasviibiatele on seinad soojad. Mõõtmistulemused näitavad, et peale soojustamist tellise lõikes seina soojuslähivus väheneb ja vastavalt tarindi soojustakistus suureneb PIR puhul rohkem kui kuus korda. Kõrgema erisoojusjuhtivusega auru juhtivate soojustuste puhul vaid 2.6 kordselt. Ka mudeli tulemused näitavad PIR ja teiste soojustuste U-arvude vahel kahekordset erinevust. Küll aga näeme suurt erinevust arvatud ja mudeldatud tarindi soojuslähivuse juures, kus mudeldatud olukorras on referentssein kaks korda soojapidavam kui näitavad mõõtmistulemused. Erinevus võib tuleneda materaliomadustest, kuid ilmselt seisneb põhjus tarindis olevatest õhkvaheedest ja õhu liikumisest. Lisaks mängib seina soojapidavuse juures rolli ka tellise niiskus, mida Delphin mudel ei pruugi võtta arvesse piisava täpsusega.

## 4 ARVUTUSLIK ANALÜÜS

### 4.1 Mudeli kalibreerimine

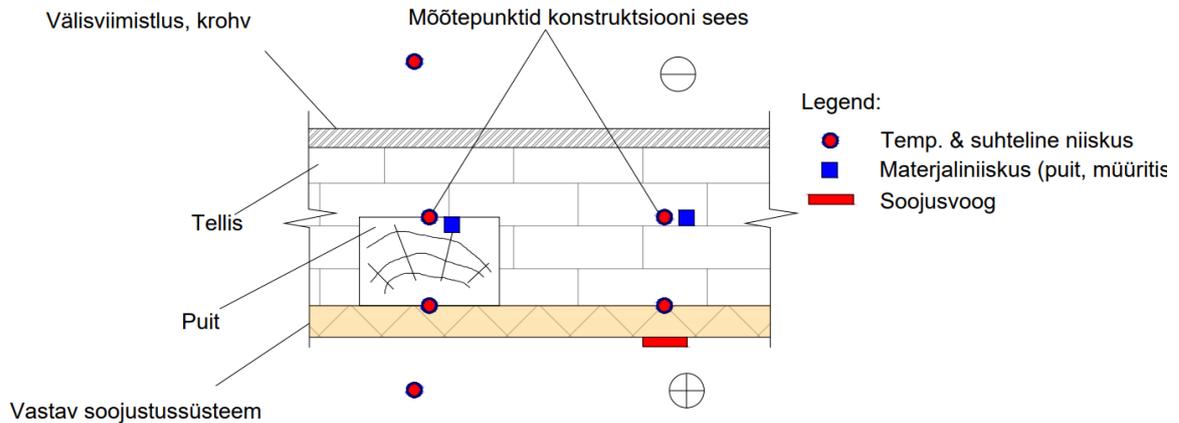
#### 4.1.1 Arvutustulemused

Mudelite toimivuse tagamiseks ja kontrollimiseks arvutati mõõdetud kliimatingimustega mõõtmisperiood läbi ning võrreldi mudeli arvutustulemusi reaalsete mõõtmistulemustega. Täpsemalt jälgiti soojusvooge soojustuse pinnal ning temperatuure ja suhtelisi niiskuseid soojustuse ja esialgse seina vahel ning samuti ka esialgse seina sees. Arvutustulemuste ja mõõdetud tulemuste võrdlusel ja vaatlusel jõuti arusaamale, kas reaalsed tulemused vastavad mudeli arvutustele, kui esines erisusi, prooviti mõista milles võib seisneda tulemuste mitte kattuvuse põhjus ning vastavalt sellele muuta mudelis materjalide parameetreid ja mudeli üldist ülesehitust. Eraldi on välja toodud erinevates asukohtades mõõdetud tulemused CaSi ja soojustuskrohvi puhul, kuna antud soojustussüsteemid paigutati katseseinal kahte eri asukohta (vaata Joonis 2.3). Mõõtmistulemused on antud kolme erineva tellise kohta ning soojustuskrohvi puhul liskas ka kahe erineva EPS graanulite baasil soojustuskrohvi materjalifaili kohta.

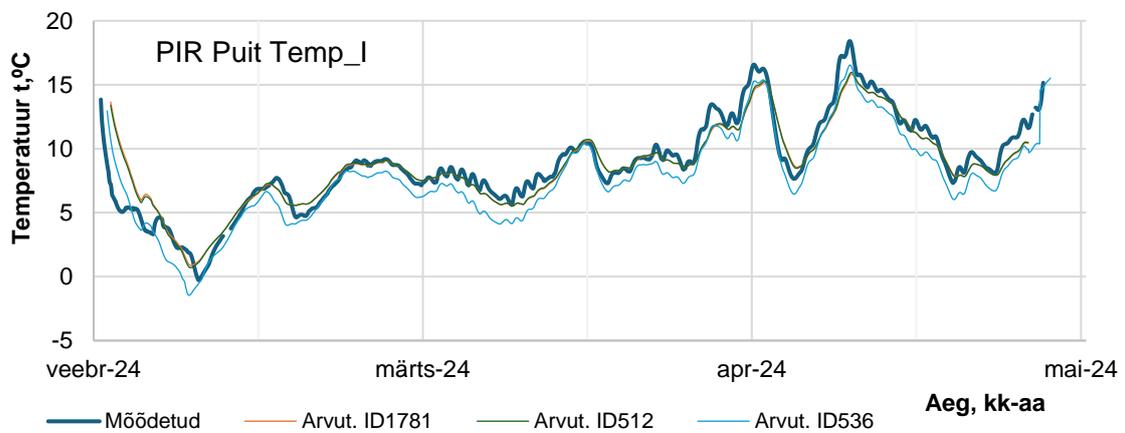
Sellise ajaloolise seina puhul varieeruvad esialgse konstruktsiooni omadused sõltuvalt asukohast suures mahus. Seina ehitamisel on kasutatud erinevates kohtades väga erinevate omadustega telliseid. Seda näitasid ka seinast võetud katsekehade omaduste määramisel saadud tulemused. Selline suur omaduste varieeruvus aga annab mudelis ka väga erinevaid tulemusi. Seega just tellise omadusi muutes sai tellise lõikes mõõtmistulemused arvutustulemustega ühtima. Rolli mängis ka tellise algniiskuse määramine, mida häälestati nii vastavalt andurite mõõtmistulemustele kui ka katsekehade omaduste määramisele. Lisaks asub olemasolevas konstruktsioonis puit, mille olemust ja paiknemist ning gabariitmõõtmete stabiilsust kogu konstruktsioonis hinnata on raske. Juba mõnes üksikus kohas konstruktsiooni avades selgus, et puit ja tema mõõtmed varieeruvad igas lõikes, kus on võetud mõõtmistulemused ning mudelis teda täpselt jäljendada, et arvutustulemused kattuksid mõõtmistulemustega, on keeruline.

Rolli mängisid ka soojustusmaterjalid ning sobiva materjalifaili valimine Delphinist. Nagu eelnevalt mainitud ja ka uuritud (Klõšeiko et al., 2023), siis kõik Delphini materjalifailid ei käitu õigesti ja ei jäljenda nende käitumist reaalses elus.

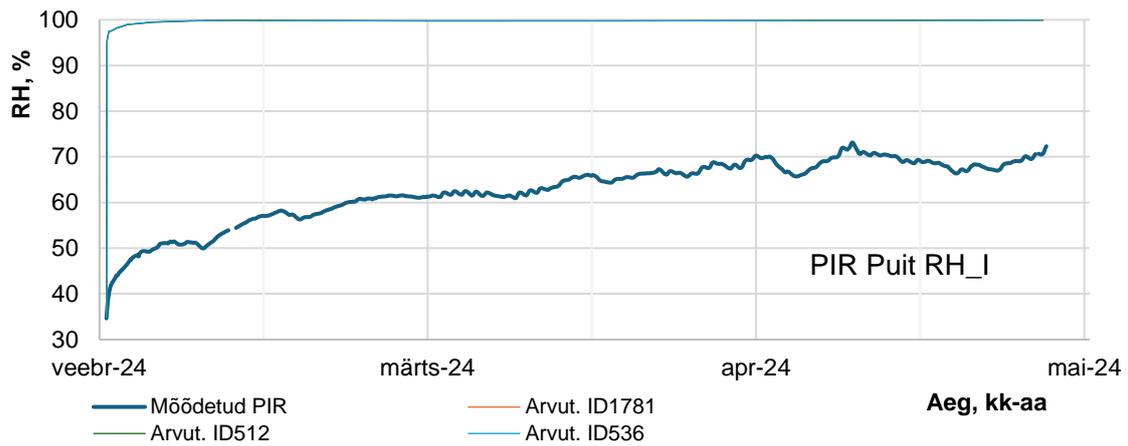
Joonis 4.2 kuni Joonis 4.13 annavad kõikide seinalõikude mõõdetud ja arvutatud temperatuurid ja suhtelised niiskused soojustussüsteemide taga ning Joonis 4.14 kuni Joonis 4.19 annavad kõikide seinalõikude mõõdetud ja arvutatud temperatuurid ja suhtelised niiskused konstruktsiooni sees Joonis 4.1 näidatud punktides.



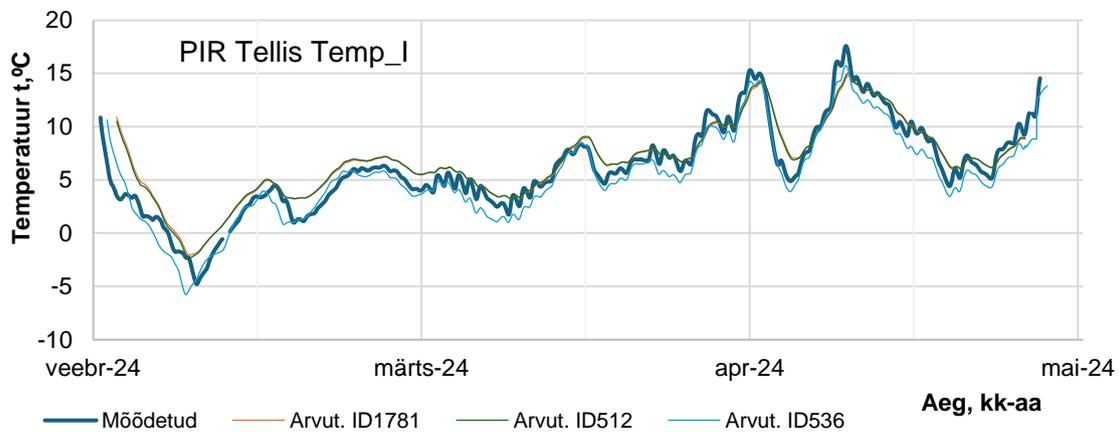
Joonis 4.1 Mõõtmispunktid konstruktsioonis



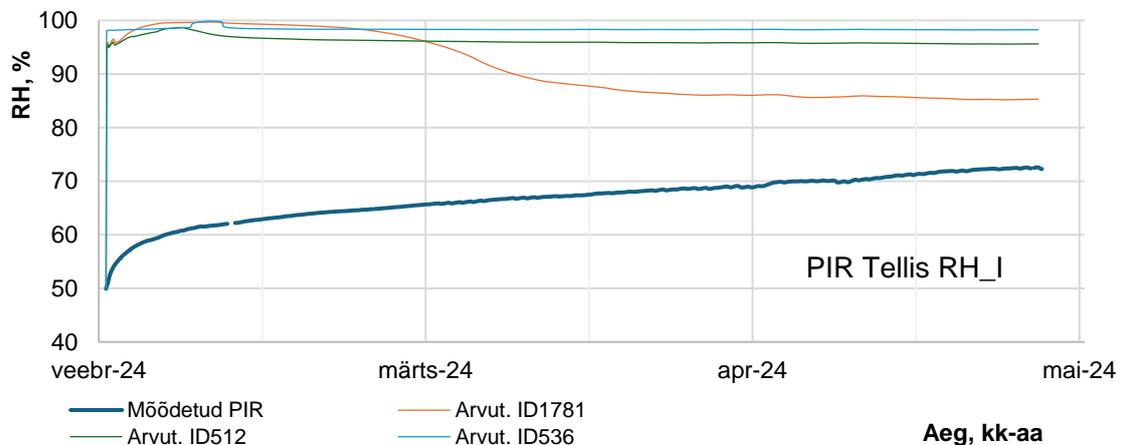
Joonis 4.2 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuurid soojustuse PIR ja esialgse seina vahel puidu lõikes



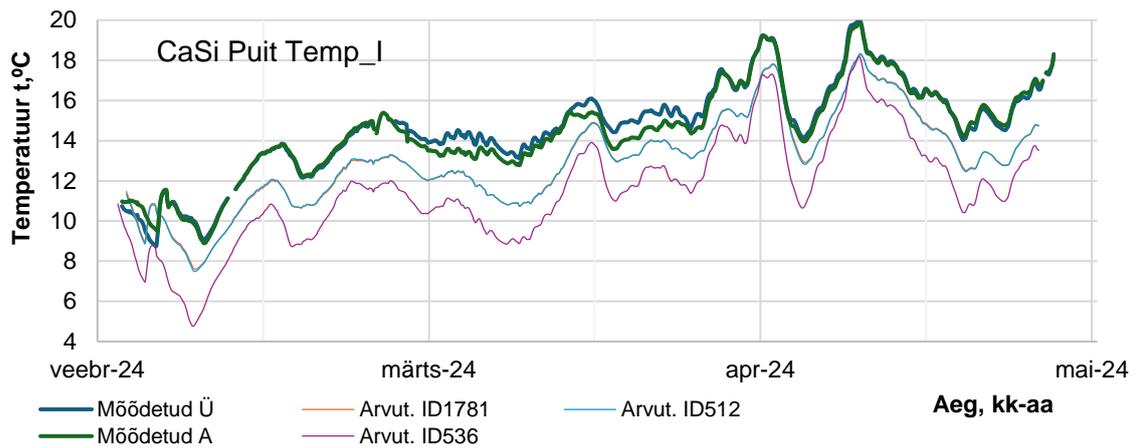
Joonis 4.3 Mõõdetud ja simuleeritud suhteline niiskus soojustuse PIR ja esialgse seina vahel puidu lõikes



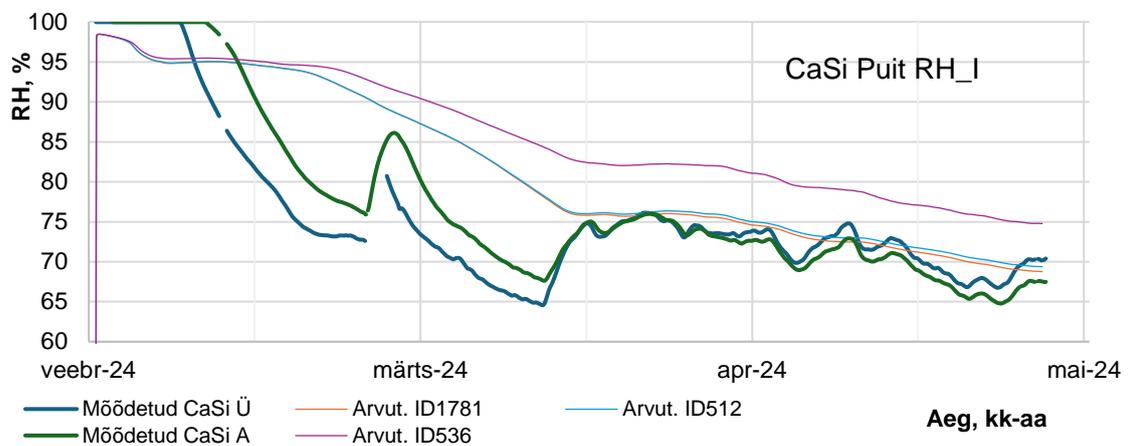
Joonis 4.4 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur soojustuse PIR ja esialgse seina vahel tellise lõikes



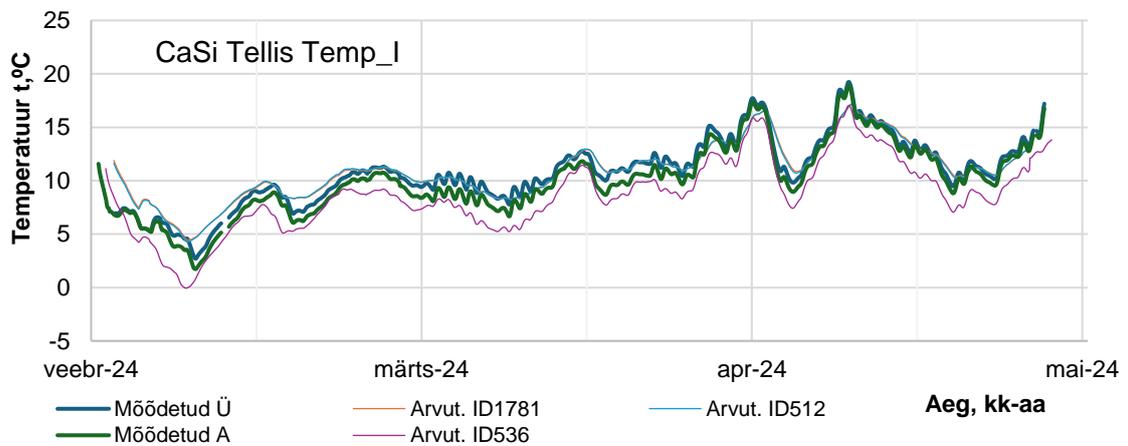
Joonis 4.5 Mõõdetud ja simuleeritud suhteline niiskus soojustuse PIR ja esialgse seina vahel tellise lõikes



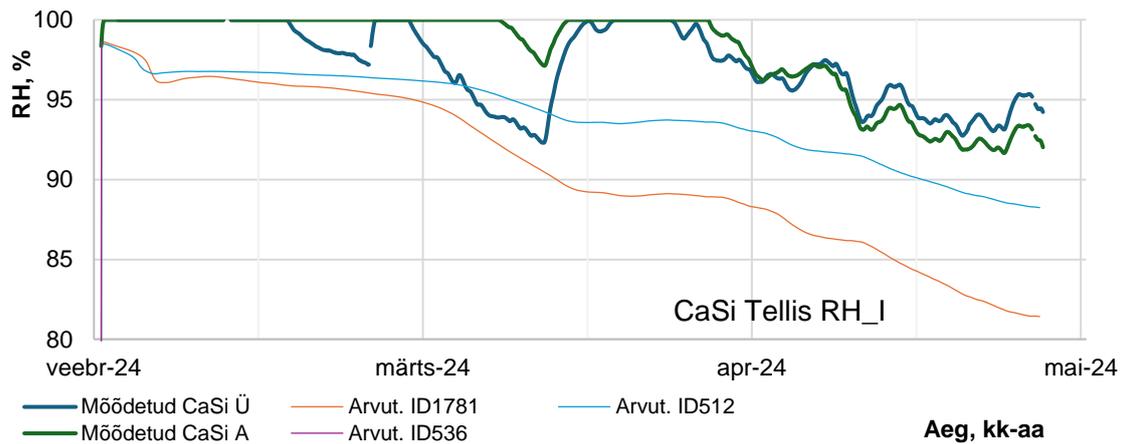
Joonis 4.6 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur soojustuse CaSi ja esialgse seina vahel puidu lõikes



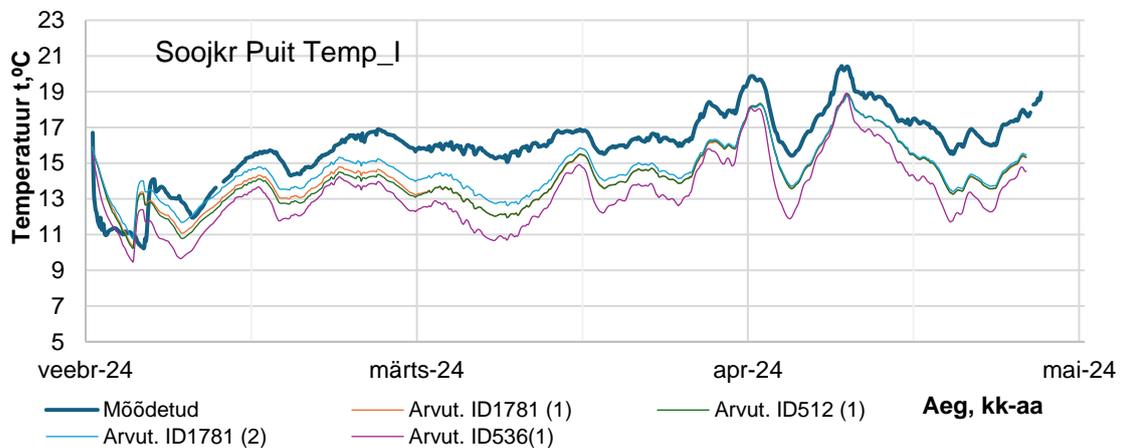
Joonis 4.7 Mõõdetud ja simuleeritud suhteline niiskus soojustuse CaSi ja esialgse seina vahel puidu lõikes



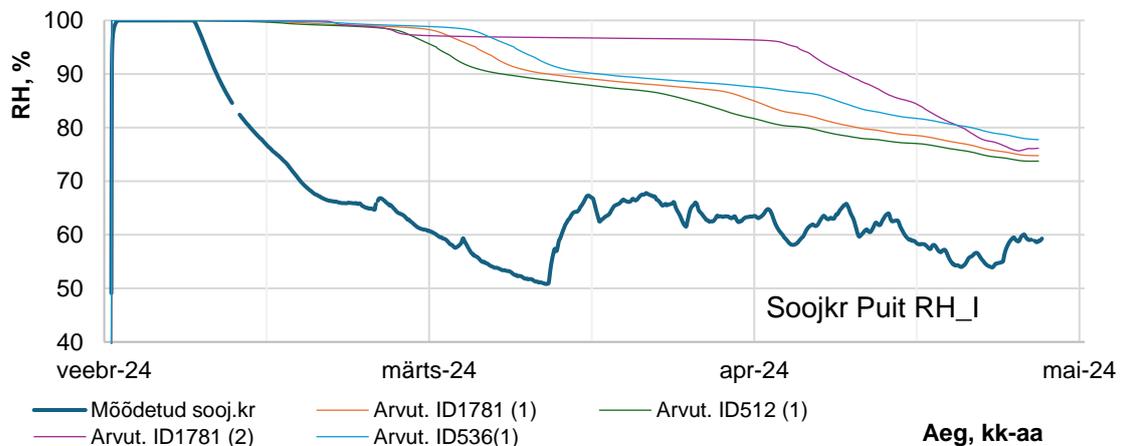
Joonis 4.8 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur soojustuse CaSi ja esialgse seina vahel tellise lõikes



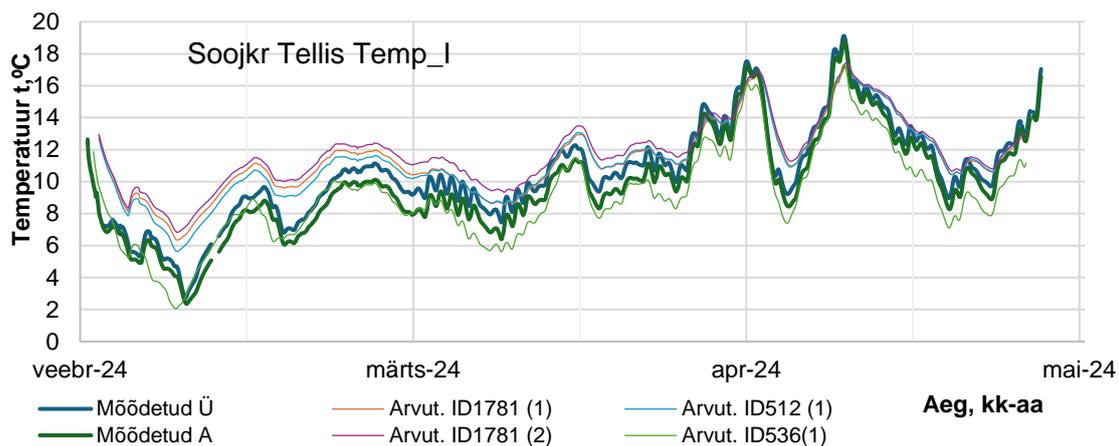
Joonis 4.9 Mõõdetud ja simuleeritud suhteline niiskus soojustuse CaSi ja esialgse seina vahel tellise löikes



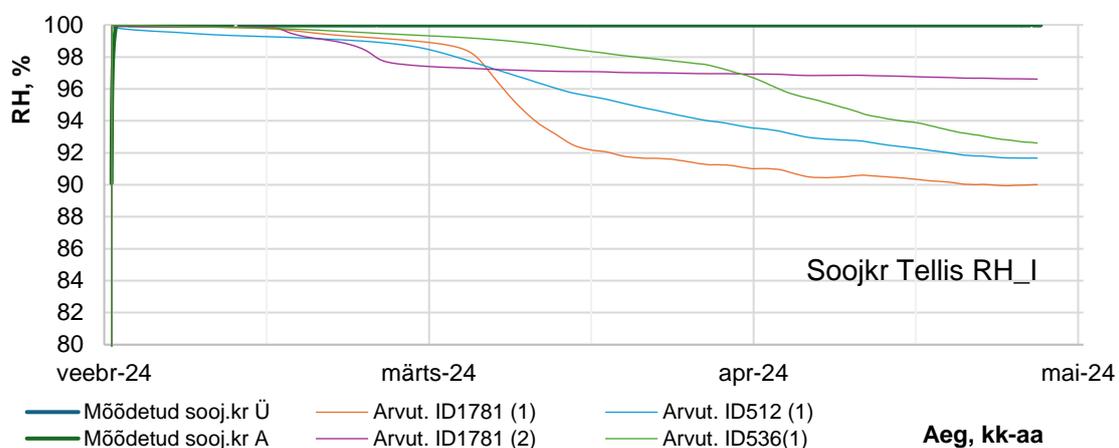
Joonis 4.10 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur soojustuskrohv ja esialgse seina vahel puidu löikes. (1) – Soojustuskrohv (704); (2) – Soojustuskrohv (429)



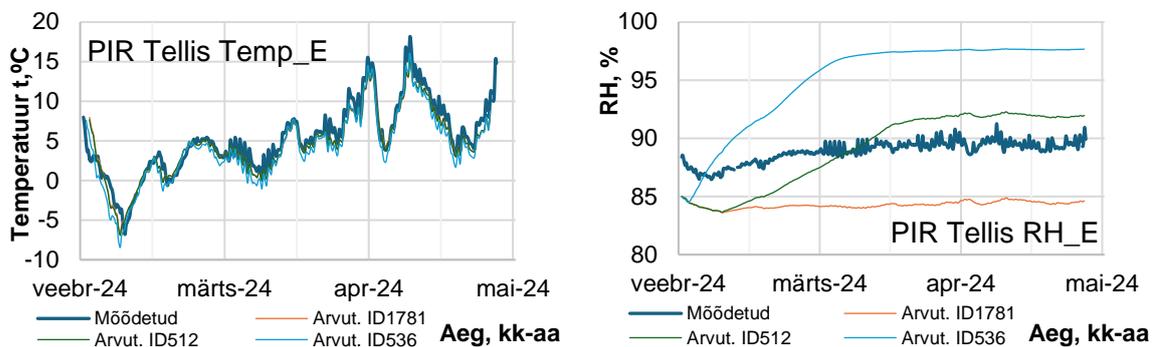
Joonis 4.11 Mõõdetud ja simuleeritud suhteline niiskus soojustuskrohv ja esialgse seina vahel puidu löikes. (1) – Soojustuskrohv (704); (2) – Soojustuskrohv (429)



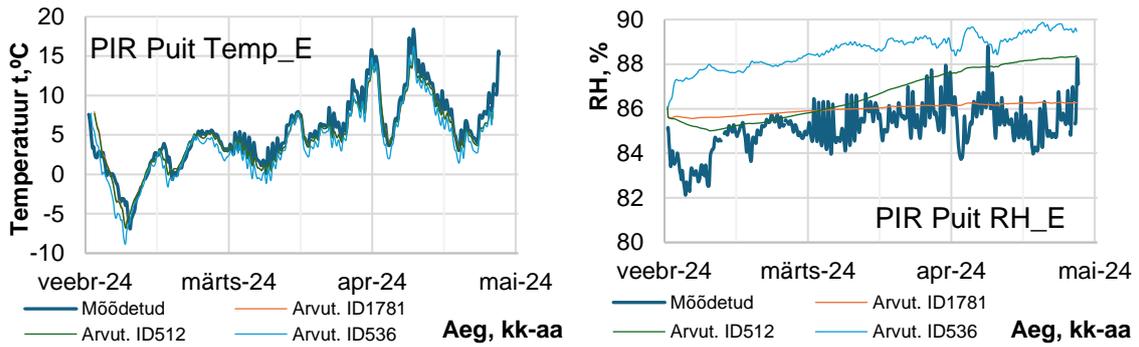
Joonis 4.12 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur soojustuskrõhvi ja esialgse seina vahel tellise lõikes. (1) – Soojustuskrõhv (704); (2) – Soojustuskrõhv (429)



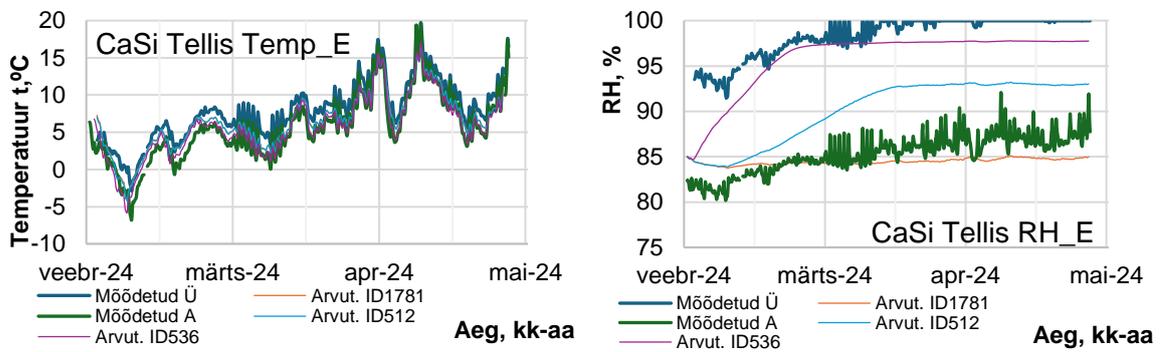
Joonis 4.13 Mõõdetud ja simuleeritud suhteline niiskus soojustuskrõhvi ja esialgse seina vahel tellise lõikes. (1) – Soojustuskrõhv (704); (2) – Soojustuskrõhv (429)



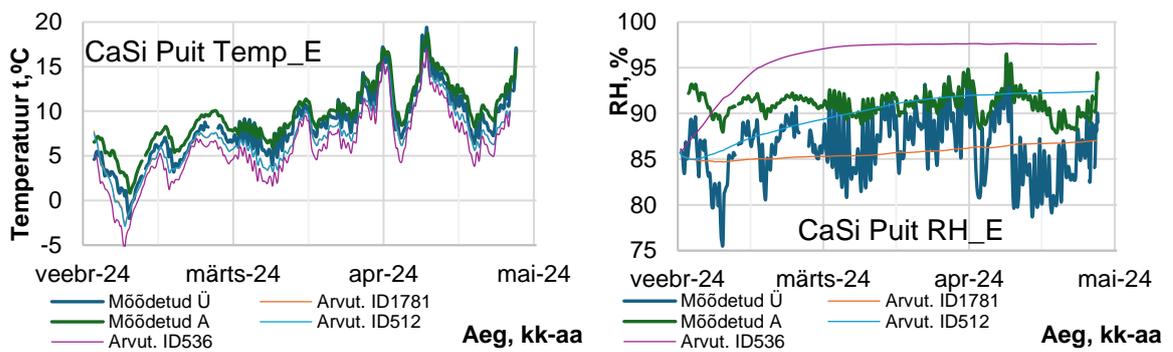
Joonis 4.14 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur (vasak) ja suhteline niiskus (parem) seina sees tellise lõikes PIR soojustusega seinas



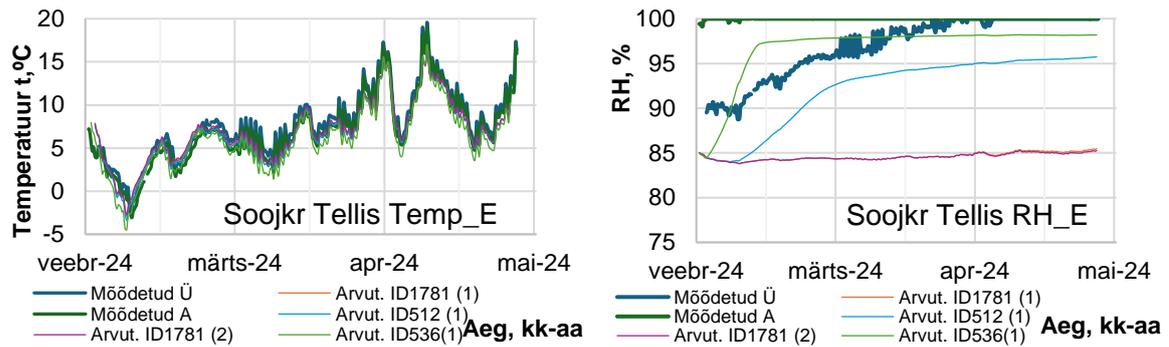
Joonis 4.15 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur (vasak) ja suhteline niiskus (parem) seinas sees puidu lõikes PIR soojustusega seinas



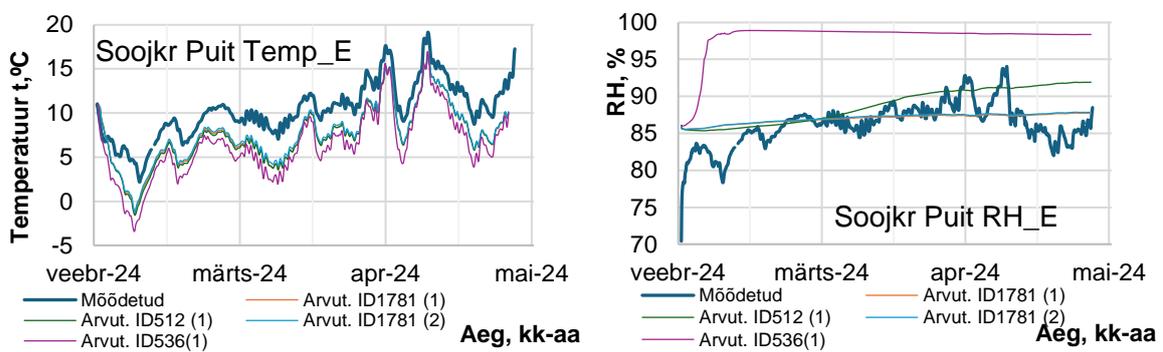
Joonis 4.16 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur (vasak) ja suhteline niiskus (parem) seinas sees tellise lõikes CaSi soojustusega seinas



Joonis 4.17 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur (vasak) ja suhteline niiskus (parem) seinas sees puidu lõikes CaSi soojustusega seinas



Joonis 4.18 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur (vasak) ja suhteline niiskus (parem) seinas sees tellise löikes soojustuskrohviga seinas. (1) – Soojustuskrohv (704); (2) – Soojustuskrohv (429)



Joonis 4.19 Mõõdetud ja simuleeritud temperatuur (vasak) ja suhteline niiskus (parem) seinas sees puidu löikes soojustuskrohviga seinas. (1) – Soojustuskrohv (704); (2) – Soojustuskrohv (429)

## 4.1.2 Kalibreerimistulemuste hindamine

### Üldist

Mudeli kalibreerimistulemusena suudeti rahuldavalt, tellise omadusi ja mudeli ülesehitust muutes, tellise löikes kõikide soojustusmaterjalide puhul saada temperatuurid soojustuse ja esialgse seinavahe vahelises punktis simulatsioonides ühtima reaalsete mõõtmistulemustega. Selle jaoks lisati mudeli täpsemaks saamiseks väliskrohvi kiht, prooviti mõõtmistulemuste põhjal täpsemaks saada tellise kihi algniiskus. Algniiskust alandati lõpuks omajagu, mis kohe ka mudeli tulemused mõõtetulemustega sarnasemaks muutis. Viimaseks, kuna telliste mõõdetud omadused varieerusid suurelt, siis selleks, et saada tulemused omavahel klappima alandati tellise soojuseri juhtivust nii madalaks kui mõõdetud omaduste järgi võimalik oli. Lisaks oli võrdluseks ka mudel, kus oli kasutatud erilise tellise materjalifaili, mille soojuseri juhtivus oli kõvasti suurem.

## **Kalibreerimistulemused**

Küll aga, isegi arvestades tehtud muudatusi mudelis, jäid suuremad erinevused sisse temperatuurides puidulõigete puhul. Simulatsioonidest saadud temperatuurid on madalamad kui reaalselt mõõdetud tulemused. Kuna madalamad temperatuurid tähendavad ka kõrgemat RH taset, mis on hallituse tekke jaoks kriitilised, on vead pigem tagavara kasuks. Kuna tellise lõigetes on tulemused paigas, siis ei tohiks olla asi tellise materjalis vaid lõikes olevas puidus ja selle ümbruses toimivas. Puidu ümbruses esineb pragusid ja vuuke, mille kaudu on õhul võimalus liikuda. Sellsieid õhu lekkeid mudel arvesse ei võta. Puit reaalses seinas oli kohati juba mädanenud, mudelis aga on tegemist värskel uue puiduga, seega on võimalik, et osaliselt mädanenud puit soojustab seinu paremini ja seda arvesse ei võta või on puidu paksus võrreldes mudelis oleva puidu paksusega oluliselt suurem. Tuleb panna tähele, et mudelisse sai puidu paksus valitud info põhjal, mis saadi konstruktsioone avades, kuid reaalselt võib igas lõikes see olla erinev, mida näitas ka erinevates kohtades lahti võetud olemasolev konstruktsioon. Teine põhjus võib olla selles, et soojustuskrohv ja CaSi plaat ei soojusta seinu nii hästi kui seda arvab Delphini mudel. Toa soojus pääseb kergelt läbi soojustuse seinu ja muudab mõõtmispunktid oluliselt soojemaks kui seda arvutab Delphini mudel. Seda kinnitaks ka asjaolu, et PIR soojustuse puhul on temperatuuride erinevus oluliselt väiksem kui soojustuskrohvi ja CaSi korral. Küll aga peaks sellisel juhul sama nähtust olema näha ka tellise lõikes, kuid seal klappivad temperatuurid rahuldavalt. Suur temperatuuride vahe on puidu lõigetes ka mõõtepunktides, mis asuvad konstruktsiooni sees, kuid tellise lõigetes jällegi kõik klappib.

## **Kombinatsioonid**

Kalibreerimise käigus sai läbi proovitud erinevaid kombinatsioone, et tulemused ka puidu lõigetes klappima saada. Katsetati puidu kihi paksuse muutmist, puidu soojuserijuhtivuse ja algniiskuse alandamist ning soojustusplaadi enda soojuserijuhtivuse alandamist, samu asju prooviti ka kombinatsioonides. Kalibreerimise protsessi tulemusel oli näha, et loogika ja mõistlikkuse piires kasvõi kõiki võtteid korruga rakendades paranesid tulemused minimaalselt. Alles siis, kui materjalide omadused viia reaalsusest kaugemale, läksid mudeli tulemused puidu lõikes ühtima mõõdetud tulemustega. Näiteks saadi CaSi puidu lõike korral tulemused ühtima kui viia puidu soojuserijuhtivus  $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  juurde, algniiskus reaalsusest kõvasti madalamaks ning CaSi plaadi soojuserijuhtivus  $0.059 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  pealt  $0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  peale. Kuid kuna CaSi on standardiseeritud toode, siis selline asi reaalsuses ei ole võimalik. Lisaks ka puidu puhul nõnda madal soojuserijuhtivus ei ole kuidagi reaalsuses võimalik. Teiseks katsetati, kui madalale tuleb viia tellise soojuserijuhtivus, et ilma teisi materjaliomadusi muutmata puidu lõikes tulemused klappima saada. Vastus on, et veel madalamale kui

seada on poorbetoonil  $<0.085 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Esiteks ei näita seda mõõdetud materjalomadused ning teiseks ei ole see ka reaalselt kuidagi võimalik, et vanadel tellistel sellised omadused oleksid. Seega järeldata seda, et kuna tellise lõigetest on meil ülevaade ja arusaam selgem kui puidu lõigetes toimuvast, siis meie eesmärk oli sättida mudeli tulemused klappima just tellise lõigetes. Ilmselt mängivad puidu lõikes õhulekked suurt rolli, mida mudel arvesse ei võta, kuid materjalomadused on õiged. On võimalik, et puidu taga on õhkvahed, kuhu pääseb soe õhk toast, mis põhjustab selliseid erinevusi. Mudelis on võimalik arvestada õhukonvektsiooni ning saada sellega klappima ka puidu lõige, kuid konvektsiooniga on võimalik kõiksugu anomaaliaid klappima saada, mis ei pruugi üldse olla probleemi põhjuseks. Seega antud olukorras konvektsiooni me ei arvesta.

### **Suhteline niiskus**

Suhtelise niiskuse käitumine mudelis ei vasta üks-ühele mõõtmistulemustega, küll aga on näha trendi, kuhu suunas hakkavad muutused toimuma. On näha, et reaalses elus toimuvad suhtelise niiskusega seonduvad muutused kiiremini kui seda mudel näitab ning seetõttu on 3 kuulise arvutustulemuste põhjal raske öelda kui hästi mudel suhtelist niiskust jäljendab. Sellised erinevused RH käitumises tulenevad sellest, et reaalselt on seinas olevate materjalide omadused midagi muud kui Delphin materjalifalides. Lisaks arvutab Delphini mudel väärtuseid tihedas ja kinnises kihis, kui reaalses elus on kihtide vahel andur, mille ümber olev õhuruum tulemusi mõjutab. Rolli mängib ka hüsterees, kus reaalses elus kuivamise ja märgumise vaheldumisel hüppab materjal adsorptsioon- ja desorptsioonkõverate vahel, seega on vaja võrdlemisi vähest niiskuse muutumist, et RH palju muutuks. Mudelis aga näeme, et seda arvestatud ei ole ning muutused RH-s toimuvad väga sujuvalt ja aeglaselt.

Soojustuse taga näeme CaSi ja soojustusrohvi puhul, et suhteline niiskus hakkab langema. On põhjust arvata, et pikaajalises mudelis jõuavad suhtelise niiskuse tulemused lähemale ka reaalsusele ning nende põhjal on võimalik teha asjakohaseid järeldusi. Vaadates mõõte- ja arvutustulemusi olemasoleva konstruktsiooni sees olevas punktis, on samuti näha, et suhteline niiskus ei ole küll üks-ühele sama, kuid mudel ja reaalne elu liiguvad samas trendis. Kuna reaalses elus toimuvad muutused suhtelise niiskusega veidi teisti kui mudel seda arvutab, siis on ka mudelist saadud tulemused üldiselt kõrgemad. Lisaks mängib rolli ka matrejali algniiskuse määramine. Kuna kõrgem niiskus tähendab kriitilist olukorda hallituse ja niiskuse tekke jaoks, siis näitab mudel meile tulemusi pigem tagavara kasuks.

## **Materjalide võrdlus**

Simulatsioonides on kasutatud erinevaid tellise materjalifaile, et näha, kas tellisest sõltuvad arvutustulemused. Kui vaadata graafikuid, siis temperatuuri juures on sõltuvalt tellisest tulemuste erinevus minimaalne. Suhtelise niiskuse puhul on väiksemaid erinevusi näha, kuid 3 kuulise perioodi kohta ei ole võimalik öelda kui määrav see on. Ka soojustuskrohve katsetati arvutustes kahte erinevat. Kuigi ka nende puhul on temperatuuride erinevus minimaalne, siis on näha, et mõju on siiski suurem kui telliste puhul. Ka suhtelises niiskuses on näha erinevat käitumist.

## **Kokkuvõte**

Kokkuvõtvalt oli mudeli kalibreerimine edukas ning arvutus- ja mõõdetud tulemused saadi rahuldavalt omavahel ühtima. Puidu lõikes esinevate õhkvahede ja võimaliku õhu konvektsiooni tõttu on telliselõike tulemused usaldusväärsemad. Mõõtmisperioodil kõik soojustussüsteemid töötasid nagu oli oodata ning ka arvutustulemused kajastavad seinas toimuvat piisavalt hästi ning esinevad vead ja erisused on reaalse eluga võrreldes tagavara kasuks ja kirjeldavad pigem kriitilisemat olukorda kui näitasid mõõtmistulemused.

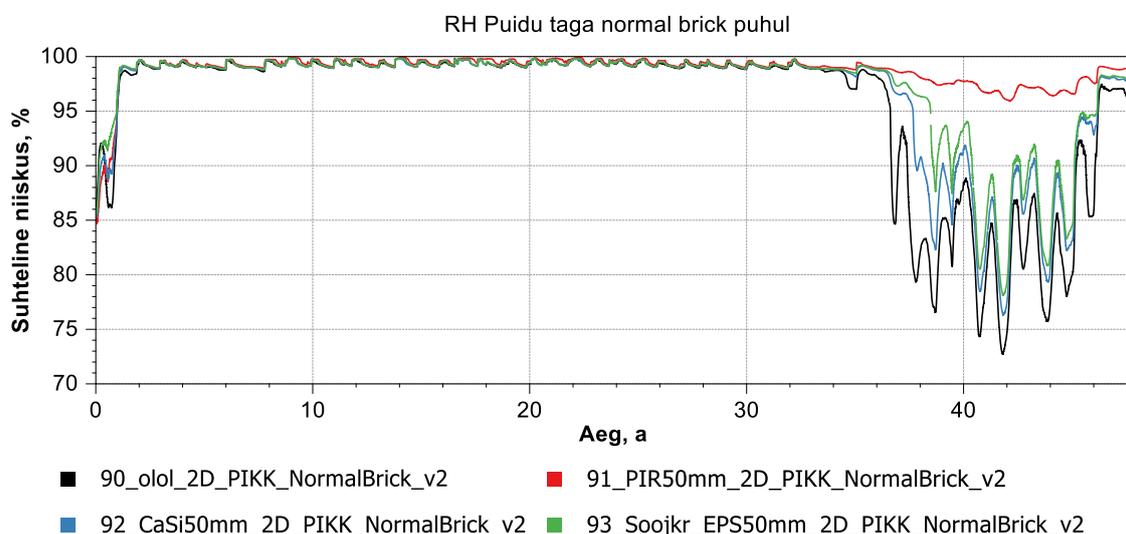
## **Pikaajaline simulatsioon**

Pikaajalise simulatsiooni jaoks kasutatakse sama ülessehitusega mudelit nagu on kirjeldatud punktis 2.2.4. Kuna seinast võetud telliste mõõdetud omaduste puhul oli näha, et seinas esineb väga erineva omadustega telliseid ning lühiajalise simulatsiooniga ei ole võimalik hinnata, kui suurt rolli erinevad materjalifailid pikas perspektiivis seinas toimivuse juures mängivad, tehakse pikaajaline mudel läbi kõigi lühiajalises simulatsioonis kasutatud tellise materjalifailidega: muudetud  $\lambda = 0.43 \text{ W}/(m * K)$  - ID1781, ID512 ja erilise tellise ID512-ga. Ülejäänud materjalide faile muudetud ei ole ning nende omadused vastavad Tabel 2.1 ja Tabel 2.2 toodud omadustele. Kõik mudelid on läbi simuleeritud 48 aastat, kasutatud kliima on Tõraveres, Eestis mõõdetud laiapõhjaline kliimaanalüüs 48 aasta jooksul vahemikus 06.1970-06.2018. Kõik mudelid on läbi arvutatud vastavalt niiskusklass 1-le ja niiskusklass 2-le. Seinaniiskustehnilise toimivuse kriteeriumiks on arvutatud hallitusmudel (Ojanen et al., 2010; Viitanen et al., 2011) ja mädanikumudel (Viitanen et al., 2008). Mis hindavad punktis suhtelise niiskuse kõrget taset ja selle püsimise ajalist mõju, mille kaudu on võimalik välja arvutada hallitusindeksid, mis hindavad kui suur on hallitustekke oht.

## 4.2 Pikaajalise toimivuse kontroll

### 4.2.1 Kokkuvõtlikud arvutustulemused ja tulemuste hindamine

Esiolgu vaatleme kõikide soojustussüsteemide puhul võrdluseks kõikide mudelite RH-taset puidu ees ja puidu taga. Kuna toimiva seina jaoks on just need punktid kõige kriitilisemad. Graafikutelt näeme niiskusklasside mõju tulemustele ja lisaks ka tulemusi erinevate telliste puhul. Nagu näeme Joonis 4.20, on näha kuidas peale 34. aastat toimub arvutustulemuste juures selge erinevus. Selle erinevuse põhjuseks on suure tõenäosusega kasutuses olev kliimafail. Kliima mõõtmisandmed algavad 1970. aastal ja lõppevad 2018. aastal. On teada, et aastal 2003 hakati määrama vihma ja ka muid kliima andmeid täpsemini ja usaldusväärsemalt. Sellest teadmisest ja joonisel nähtavast tulemuste erinevusest võib järeldada, et enne 2003. aastat mõõdetud vihma kogused olid arvestatud kõvasti suuremad ja kliimaandmed karmimad kui nad realselt on. Seetõttu vaatleme parema reaalse pildi saamiseks simulatsiooni viimast 18 aastat. Kuna vihma andmed kliimafailis mõjutavad seinale langevat kaldvihma ja selle mõju, siis mida rohkem väliskeskkonna poole on uuritav punkt, seda suurem on selle mõju. Graafikute joontel „eriline“ tähistab ID536 tellist, „Normalbrick“ tähistab ID512 tellist ja ilma täpsustuseta tähistab ID1782 tellist.

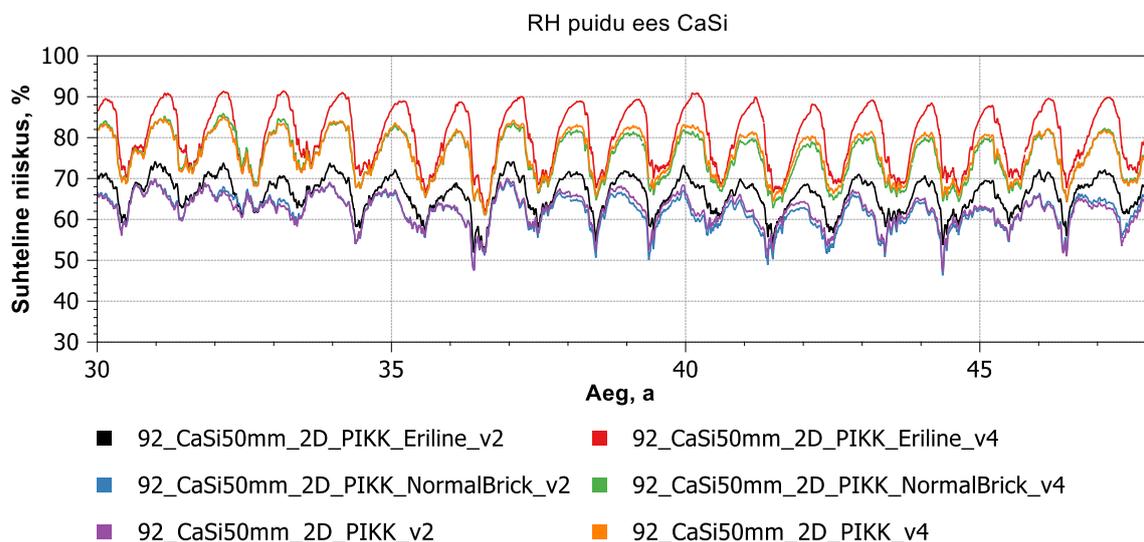


Joonis 4.20 Suhteline niiskus puidu taga normal brick niiskusklass 1 puhul

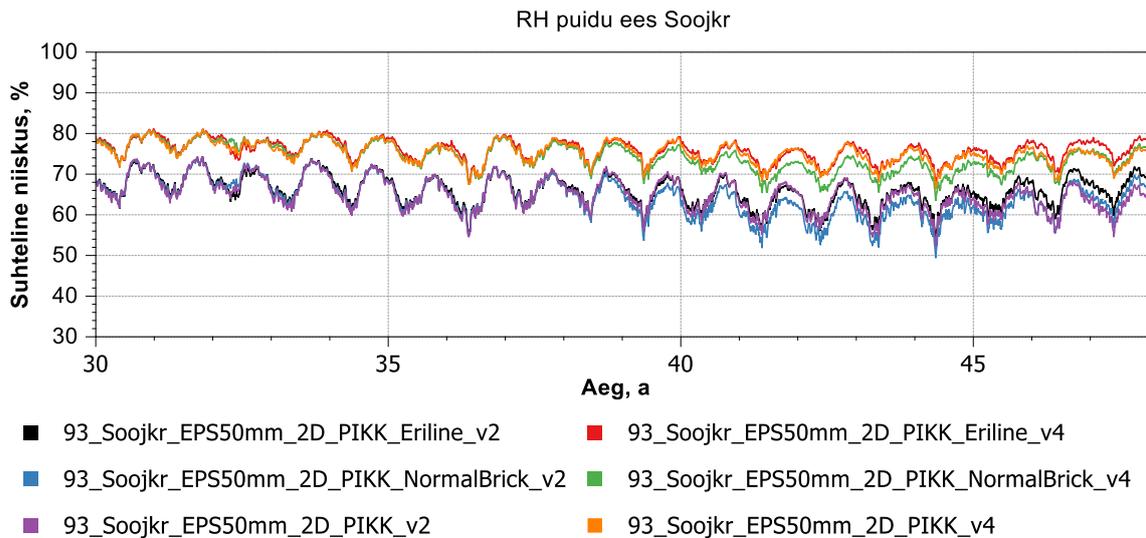
Puidu ees soojustuse taga näeme auru juhtivate soojustuste puhul (Joonis 4.21, Joonis 4.22) selget niiskusklassist tulenevat mõju, kus kõikide telliste puhul on niiskusklass 2 korral suhteline niiskus puidu ees soojustuse taga kõrgem. Küll aga on see erinevus CaSi korral ca 15%-20% kõrgem, soojustuskrohvi puhul on erinevus ca 10%. Kuna tegemist on auru juhtivate soojustustega, siis on selline erinevus ka oodatav, kuna toas

olev niiskus pääseb läbi soojustuse seina sisse. Madalama niiskuslisa korral jäävad suhtelised niiskused normaalsuse piiresse ja ei ületa ohtlikku suhtelise niiskuse piiri, mis tekitaks soojustuse taga hallitust. Suhteline niiskus kõigub 50% ja 74% vahel. Kõrgema niiskuslisa korral aga tulemused niiskemal ajal ületavad 80% piiri CaSi korral iga aasta, kas see on ka hallituse tekkeks kriitiline vaatleme hallitusmudelite juures. Soojustuskrohvi tulemused kõrgema niiskuslisa korral jäävad 80% piiri lähedale, kuid olukord on parem kui CaSi puhul. Vaadeldes telliste mõju suhtelisele niiskusele hakkab silma, et karmimate omadustega "Eriline tellis ID536" puhul on CaSi tulemuste võnkumise amplituudid silmnähtavalt suuremad kui teiste telliste puhul, seda nii madalama kui ka kõrgema niiskuslisa puhul. Tellis juhib soojust paremini, seega on ka temperatuurid talvel seinas külmemad, mille tõttu on suhtelised niisksued talvisel ajal kuni 10% kõrgemad. Soojustuskrohvi puhul erineva tellise mõju oluliselt väiksem, kuid mõlema soojustuse korral Kõige paremaid tulemusi näitab normal brick ID512 ja kõige halvemaid eriline tellis ID536.

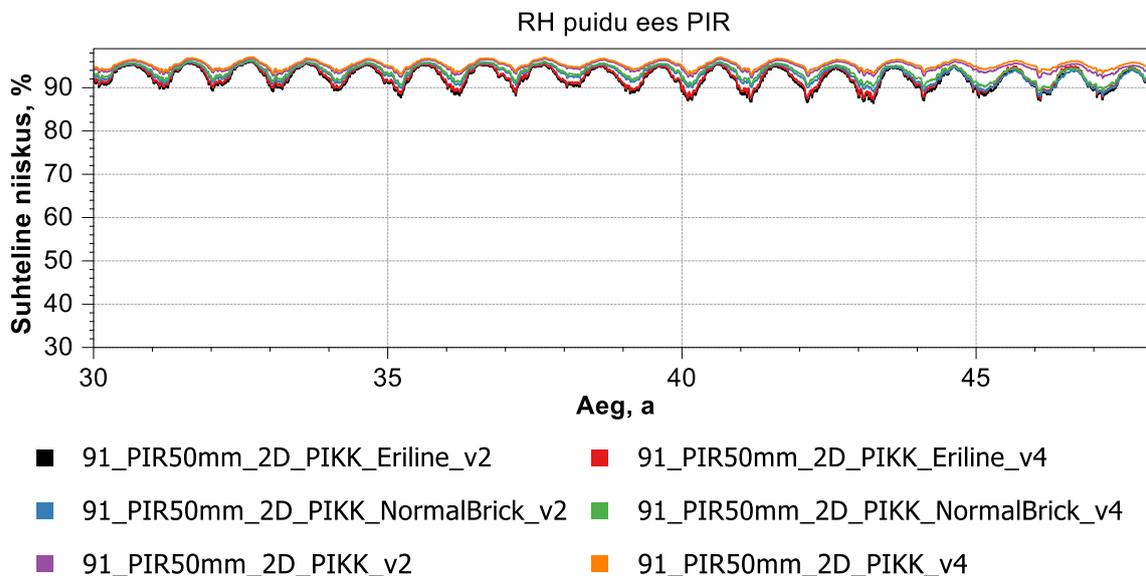
Aurutihe PIR aga toapoolset niiskust seina lasta ei tohiks, seega ei tohiks olla näha erilist mõju niiskuslisa muutmisest. Seda näeme ka Joonis 4.23 tulemustelt, kus on näha, et niiskuslisa tulenevad erinevused on minimaalsed. Vastupidiselt auru juhtivatele soojustustele näitavad PIR-i puhul parimaid tulemusi just erilise tellisega arvatatud mudelid, kuid kõikide olukordade puhul on suhteline niiskus stabiilselt vahemikus 87%-97%, mis võib olla piisav hallituse tekkeks.



Joonis 4.21 Suhteline niiskus puidu lõikes CaSi soojustuse taga



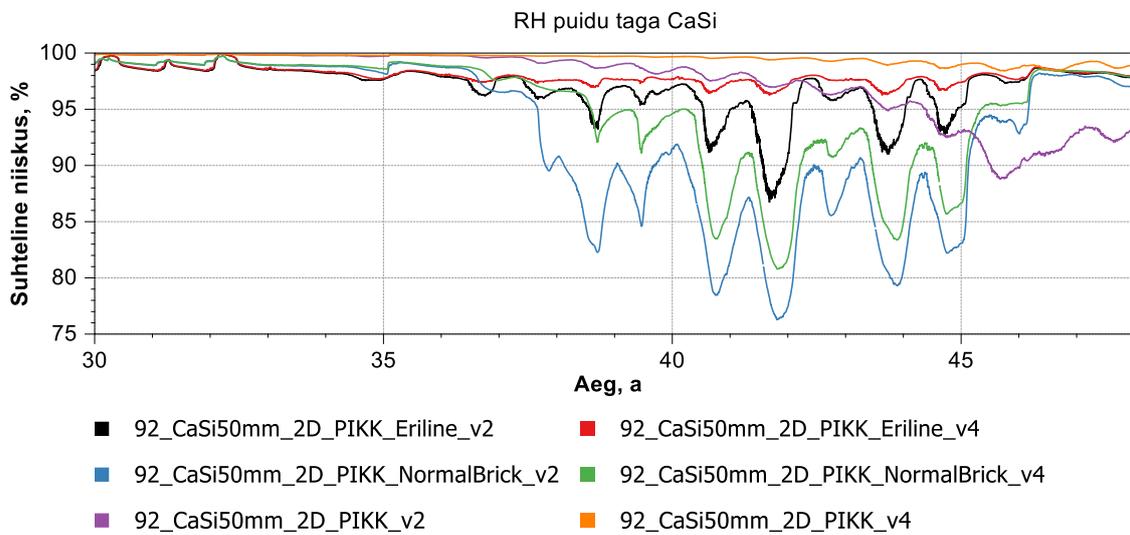
Joonis 4.22 Suhteline niiskus puidu lõikes soojustuskrohvi taga



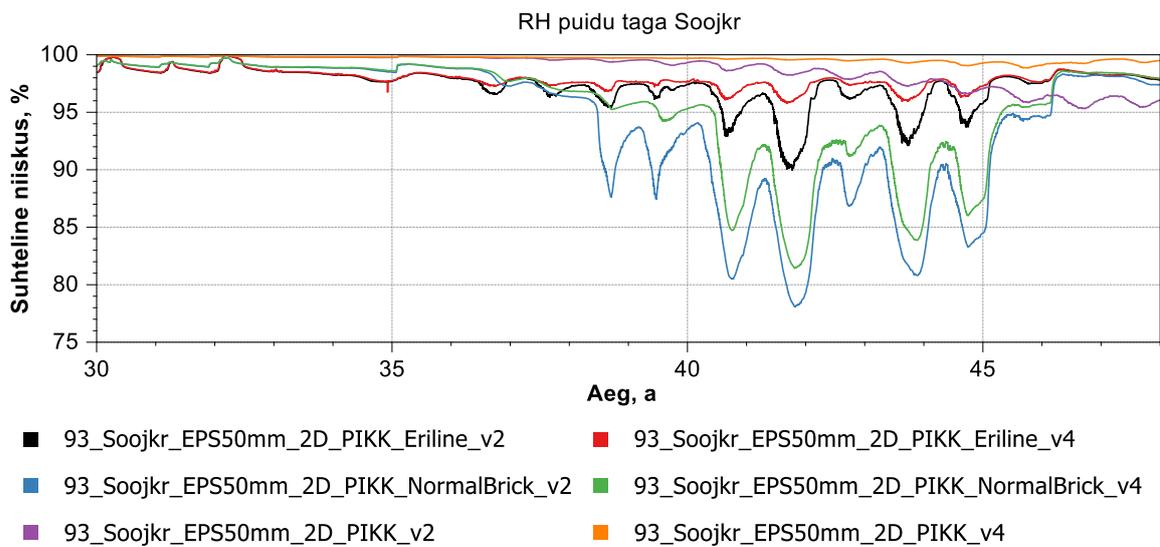
Joonis 4.23 Suhteline niiskus puidu lõikes PIR-i taga

Puidu lõikes on lisaks kõrge suhtelisest niiskusest tulenevale hallitusohule puidu ees kriitiline ka puidu taga toimuv. Puidu teine serv asub külmas tellise seina sees ning konstruktsioone avades oli juba olemasolevas olukorras näha osalist puidu mädanemist. Joonis 4.24 kuni Joonis 4.26 näeme kuidas mõjutavad erinevate soojustuste puhul niiskust ja telliste omadused puidu taga olevat suhtelist niiskust. Kliimafaili tõttu on perioodil kui vihma mõõdeti ebatäpselt suhtelised niiskused kõikide soojustuste korral väga kriitilised ja stabiilselt üle 95%. Kui vihma mõõtmised läksid usaldusväärsemaks, näeme sarnast suhtelise niiskuse kukkumist CaSi ja soojustuskrohvi puhul. PIR-i korral jäävad tulemused ületama 95% piiri, seega on hallituse teke ja ka mädaniku tekke oht suur. Puidu taga oleval punktis mängivad tellise omadused suuremat rolli kui

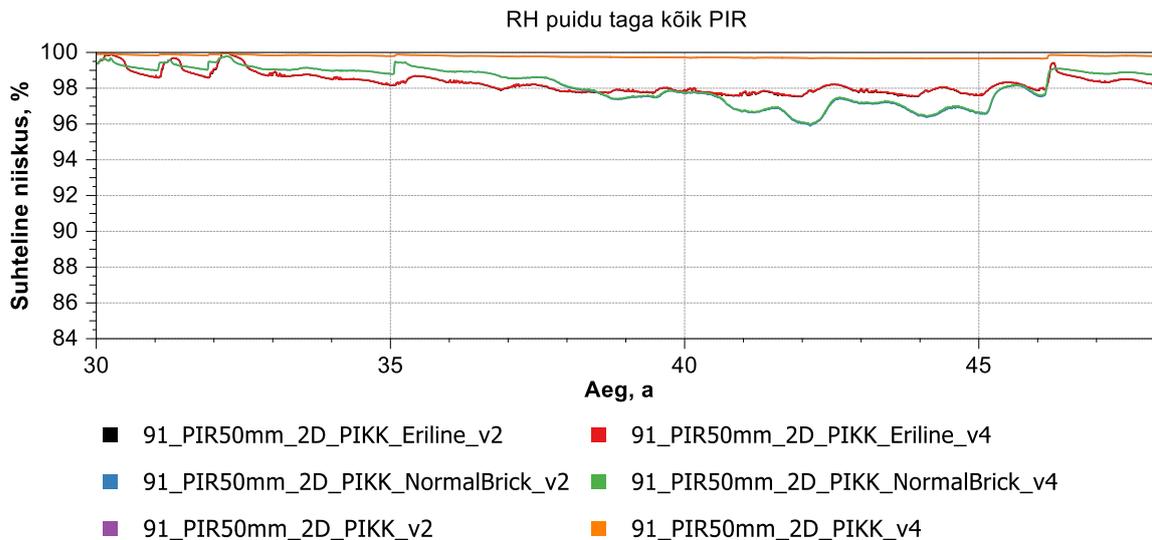
niiskuslisa. Kuna seda punkti mõjutab otseselt kaldvihm, siis mida parem on tellise veejuhtivus ja niiskuse mahtuvus, seda suuremad on ka suhtelised niiskused.



Joonis 4.24 Suhteline niiskus CaSi soojustuse puidu lõikes, puidu taga



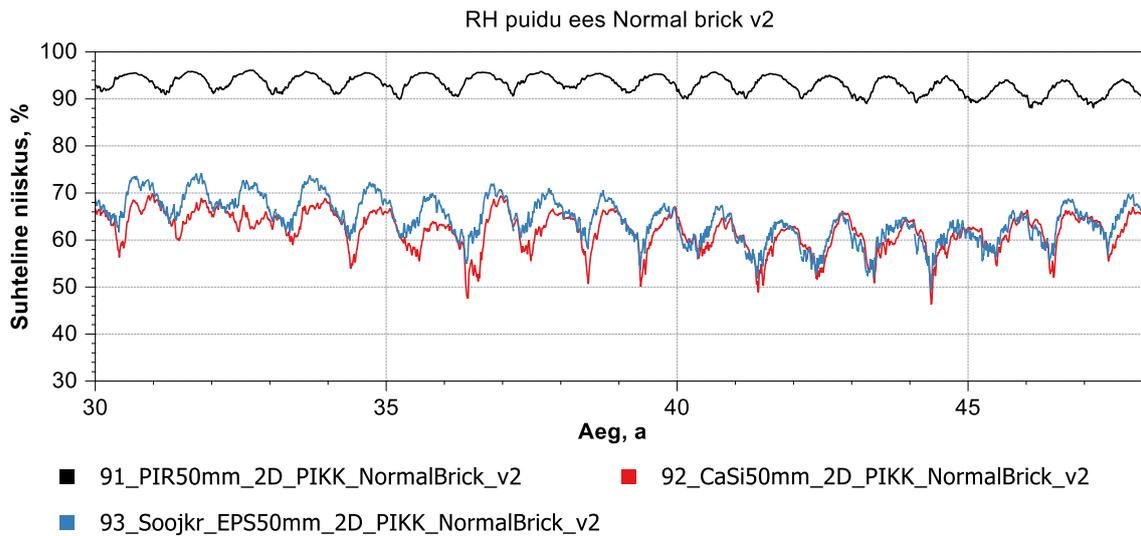
Joonis 4.25 Suhteline niiskus soojustuskrohvi puidu lõikes, puidu taga



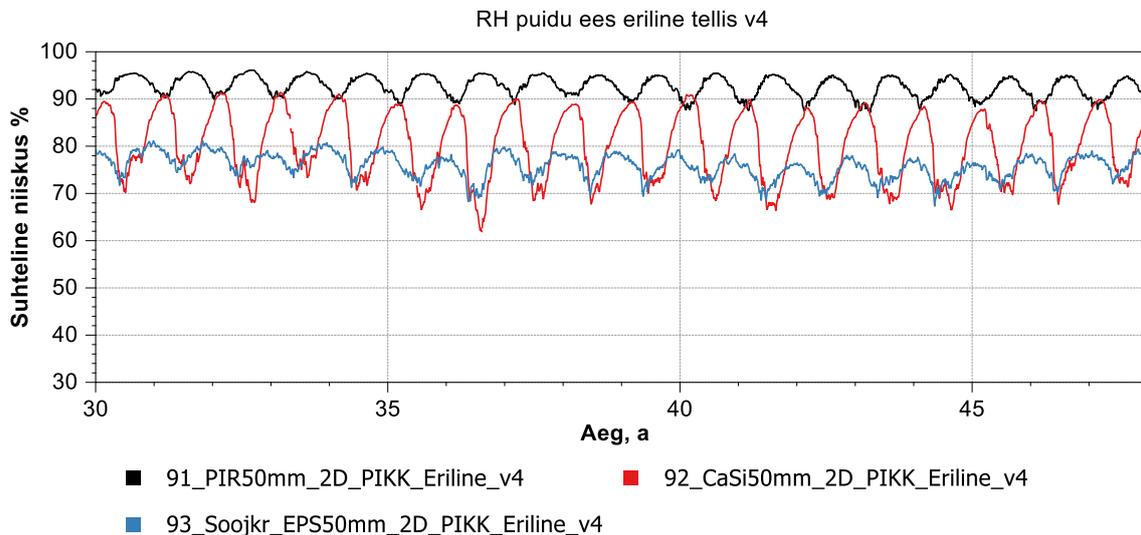
Joonis 4.26 Suhteline niiskus soojustuse PIR, puidu lõikes, puidu taga

Kuna olemasolev sein koosneb erinevate omadustega tellistest, vaatleme lähemalt kõikidest mudelitest stabiilselt kõige paremaid ja keskmiselt kõige halvemaid tulemusi andnud olukordi. Kõige paremaid tulemusi näitas normal brick ID512 niiskusklass 1 korral ning kõige halvemaid eriline tellis ID536 niiskusklass 2 korral. Tuleb ka meele pidada, et kuigi vaatleme ajavahemikku, kus kaldvihma mõju oli usaldusväärsemalt mõõdetud, siis siiski ulatub kaldvihma mõju varasemast perioodist ka meie vaatluse all olevasse perioodi, seda eriti mudelite puhul, kus tellise niiskusmahtuvus on suur.

Joonis 4.27 ja Joonis 4.28 näeme, et PIR-i puhul on olukord igal juhul kriitiline ja suhtelised niiskused puidu ees väga kõrged >90%. Kõige stabiilsemat ja paremat tulemust näitab soojustuskrohv, kuigi CaSi korral on "heas" olukorras paremad tulemused, siis tema tulemusi mõjutavad tellise omadused ja niiskuslisa ohtlikult palju ja kui seinas on erinevate omadustega tellised siis võib see saada saatuslikuks. Soojustuskrohvi puhul kummagi olukorraga midagi kriitilist puidu ees soojustuse taga arvutustulemuste puhul ei paista.

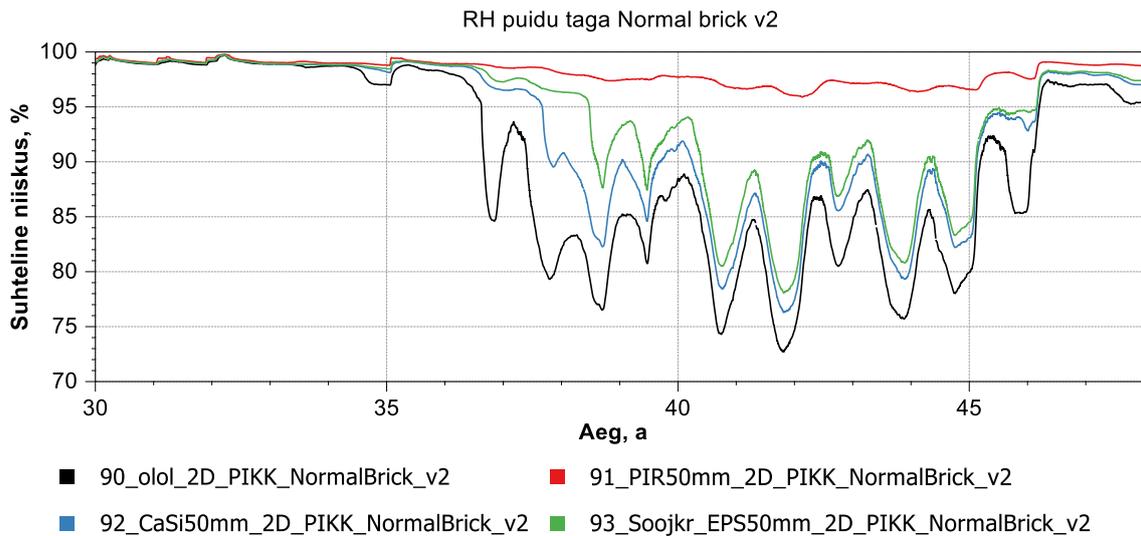


Joonis 4.27 Suhteline niiskus puidu ees normal brick niiskusklass 1 korral

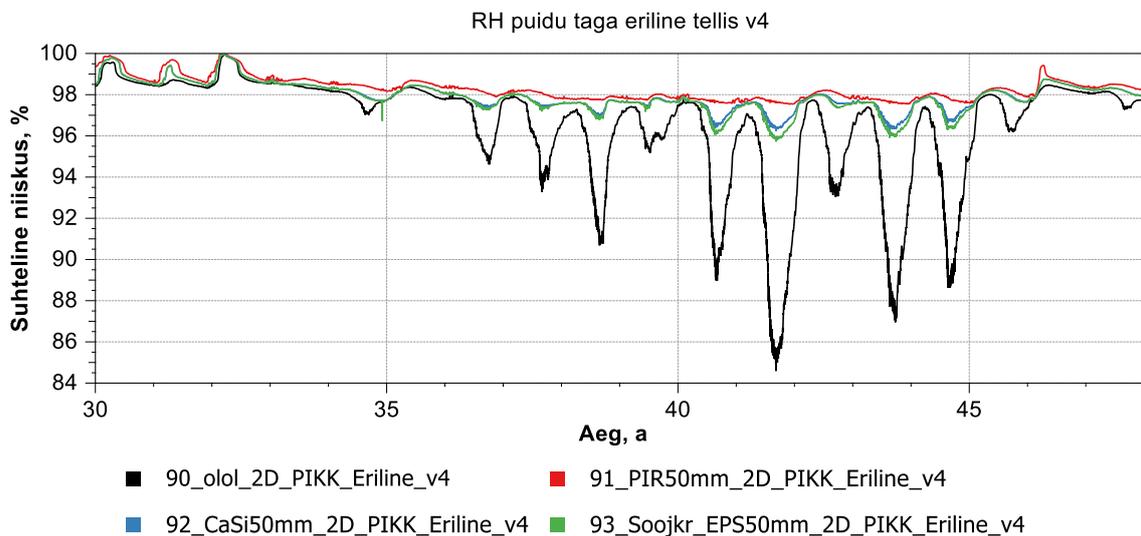


Joonis 4.28 Suhteline niiskus puidu ees erilise tellise niiskusklass 2 korral

Puidu taga oli juba olemasoleva seinä puhul kohati näha puidu mädanemist ning arvutustulemused näitavad, nagu ka arvata oli, et soojustuse paigaldamine olenemata soojustusest muudab puidu olukorra seinä sees kriitilisemaks. Lisaks ka näeme Joonis 4.29 ja Joonis 4.30, et leebemas olukorras on auru juhtivate soojustuste puhul küll seis sarnane olemasoleva olukorraga, kuid sellegi poolest olukord halveneb. Seega olenemata kui soodsad tellise omadused seinä ei ole, siis puidu mädaniku areng tundub vältimatu.



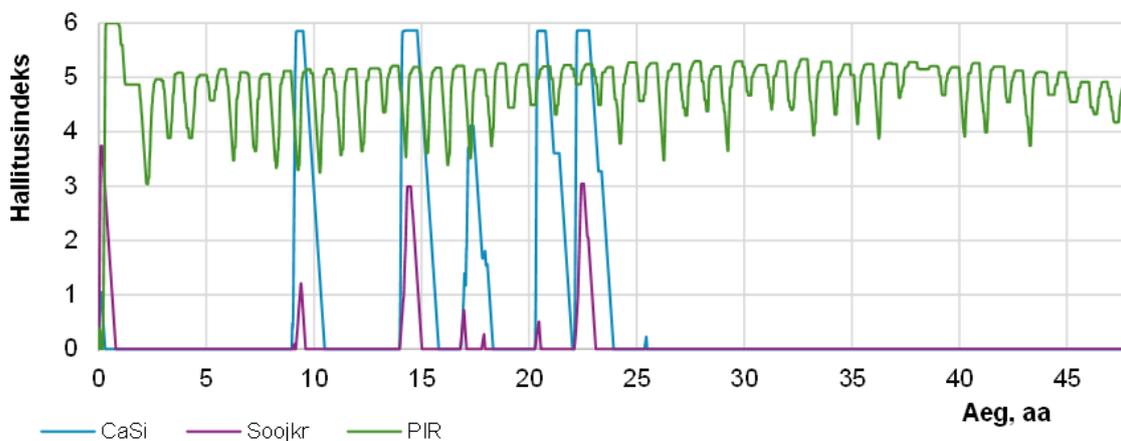
Joonis 4.29 Suhteline niiskus puidu taga Normal brick niiskusklass 1 korral



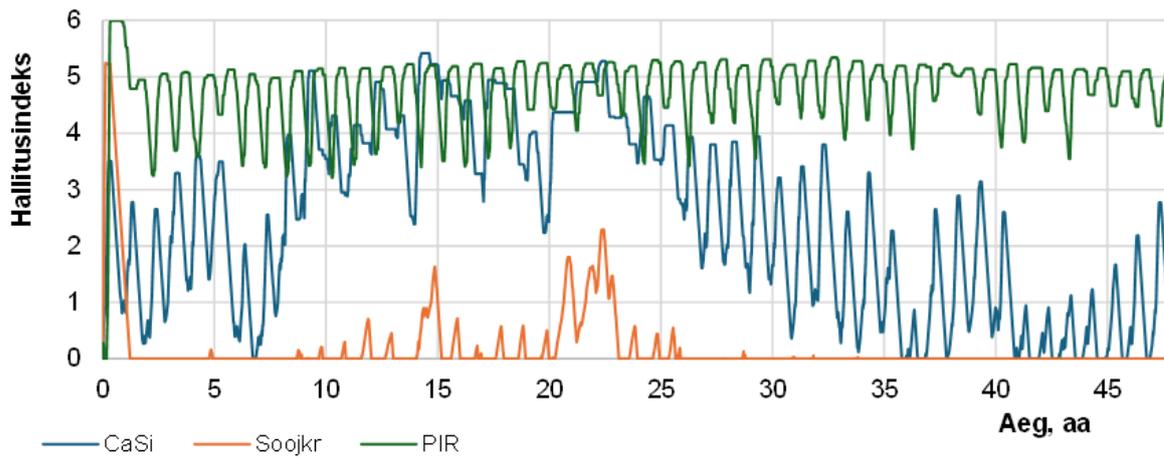
Joonis 4.30 Suhteline niiskus puidu taga erilise tellise niiskusklass 2 korral

Järgnevalt vaatleme kogu 48 aasta kohta hallitusmudeleid puidu ees soojustuse taga. Hallitusmudelid on samuti tehtud eelnevalt uurimise all olnud ja parimaid tulemusi näitanud normal brick ID512 kohta ja kõige halvemaid tulemusi näidanud erilise tellise ID536 kohta. Igal juhul ei tohi lasta hallitusel soojustuse taha tekkida, et tagada töötav soojustuse lahendus ja kui hallitus sinna tekib ei tohi lasta tal tervisliku sisekliima tagamiseks pääseda siseõhku. Hallitusindeks hindab hallituse kasvu riski ja tõenäosust avatud pinnal, mida kõrgem on hallitusindeks, seda suurem on hallituse tekke risk ja selle kasv. Meie vaadatud punktid asuvad seina sees, seega ei pruugi hallitusmudel reaalselt oukorda päris õigesti ennustada. Siiski annab ta meile ülevaate, kus on olukord parem ja kus halvem.

Puidu lõikes soojustuse taga, vaadates Joonis 4.31 ja Joonis 4.32, on selge, et PIR-i taga on hallituse oht kõige suurem. Indeksid on läbivalt ja stabiilselt mõlemal juhul 4 ja 5 vahel, mis viitavad sellele, et avatud sein puhul oleks sein suures ulatuses ja nähtavalt hallitanud. Nagu ka suhtelise niiskuse puhul oli näha, et kõige leebema ja kriitilisema mudeldatud olukorra erinevused mõjutavad enim CaSi taga toimuvat, siis kandub see edasi ka hallitusmudelitesse. Kui kõige leebemas olukorras on CaSi puhul näha vaid paar üksikut hallituse kasvu perioodi, siis hullemas olukorras on hallituse oht palju kaootilisem ja hallitusindeks hüppab stabiilselt kahe, kolme ja nelja vahel. Silma hakkab ka eelnevalt mainitud asjaolu, et kaldvihma mõju on esimese 30 aasta jooksul ebaratsionaalselt suur ning mitte usaldusväärne, seega hallituse risk on suurem simulatsiooni algusaastatel ning peale 30. aastat leebemas olukorras hallituse risk 0 ja hullemas olukorras vaid ühe ja kolme vahel. Seega kui jälgida ualdusväärsemat aega simualtsioonis, siis CaSi puhul suurt hallituseriski soojustuse taga ei teki, küll aga on selle võimalus olemas hullema olukorra puhul. Soojuskrohv järjekordselt annab parimaid tulemusi ja nähtavat hallitust ja hallitusekasvu soojustuse taha tekkida ei tohiks, isegi mitte kõige hullema arvutusmudeli korral.

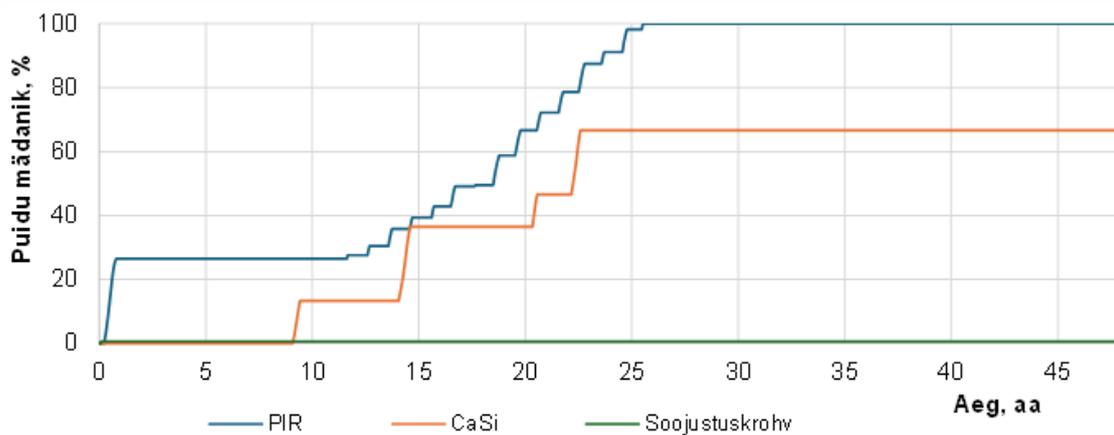


Joonis 4.31 Hallitusmudelid erinevate soojustuste taga puidu lõikes Normal Brick ID512 korral, niiskusklass 1

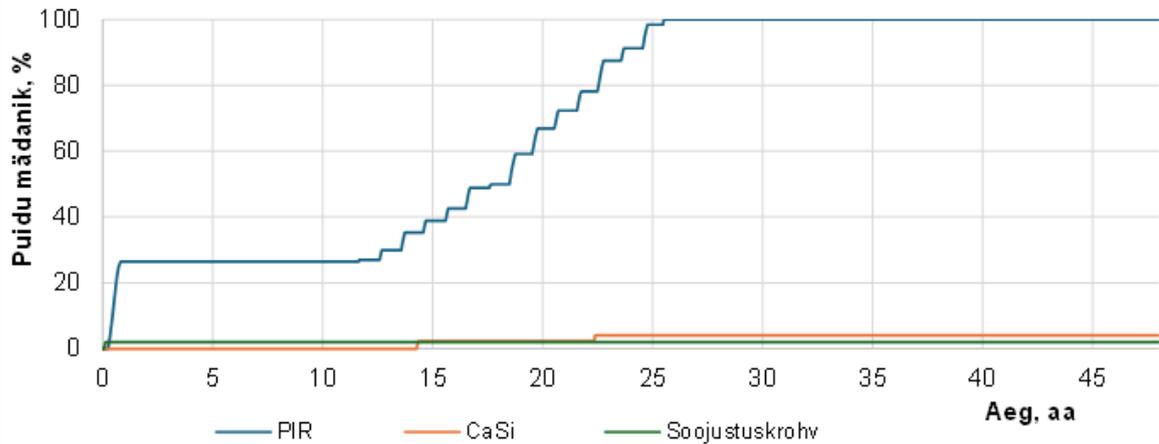


Joonis 4.32 Hallitusmudelid erinevate soojustuste taga puidu löikes Erilise tellise ID536 korral, niiskusklass 2

Kõik, mida nägime suhtelise niiskuse tulemustest ja hallitusmudelites, kajastub ka mädaniku mudelis puidu ees (Joonis 4.33, Joonis 4.34). PIR-i puhul toimub igas olukorras soojustuse taga puidu mädanemine. Soojustuskrohv'i puhul mädanemist ei esine. CaSi korral mingil määral mädanemine mädanikumudeli põhjal toimub, kuid seda ainult seetõttu, et ebausaldusväärse kaldvihma tõttu on hallitusmudelil kriitilisi hetki, mis puidu mädanemist põhjustavad. Samas näeme, et peale 30. aastat jääb mädanemine seisma ning hullemas olukorras, seda üldse ei toimu. Seega võib järeldada, et aurujuhtivate soojustuste puhul soojustuse taga puit mädanema ei tohiks minna.

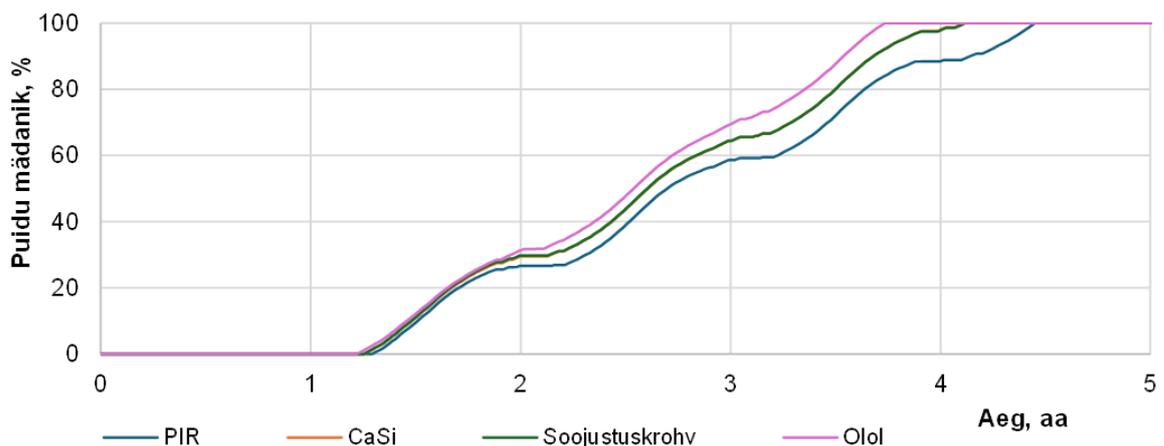


Joonis 4.33 Puidu mädaniku mudel erinevate soojustuse taga normal brick ID512 puhul, niiskusklass 1

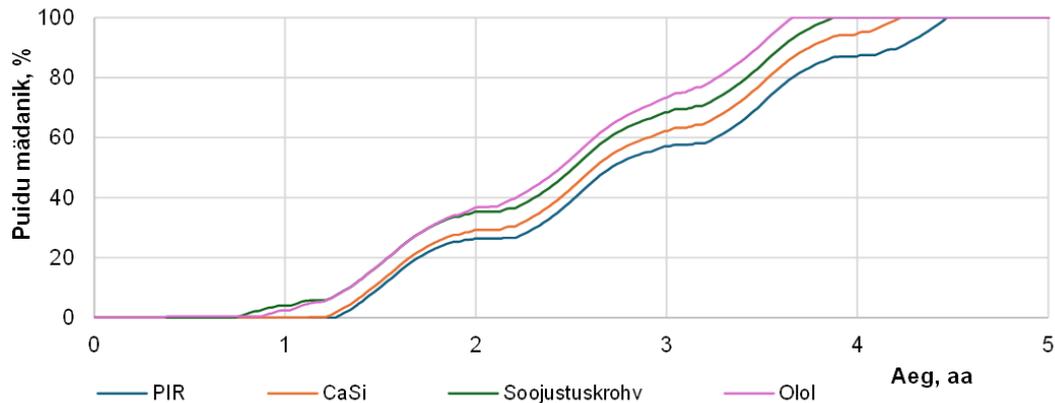


Joonis 4.34 Puidu mädaniku mudel erinevate soojustuse taga erilise tellise ID536 puhul, niiskusklass 2

Puidu taga oli puit osaliselt juba olemasolevas olukorras mädanenud ning nagu näitasid arvutustulemused suhtelise niiskuse kohta puidu taga, siis seina soojustamine ainult raskendab puidu seisukorda. Seega puidu taga on mädaniku oht reaalne, ükskõik millist soojustust kasutatakse. Kas see on nii kriitiline nagu on näha joonistelt Joonis 4.35 ja Joonis 4.36, kus näeme juba viie aastaga täielikku puidu mädanemist, siis ilmselt mitte, kuna Joonis 4.20 näitas meile, et kaldvihma mõju antud punktis on väga suur ning mudeli järgi mädaneb puit ära enne kui arvutusmudel usaldusväärsemalt kaldvihma arvestama hakkab. Sellegipoolest on sinna mädanikku oodata ja puidu olukord hea ei ole.



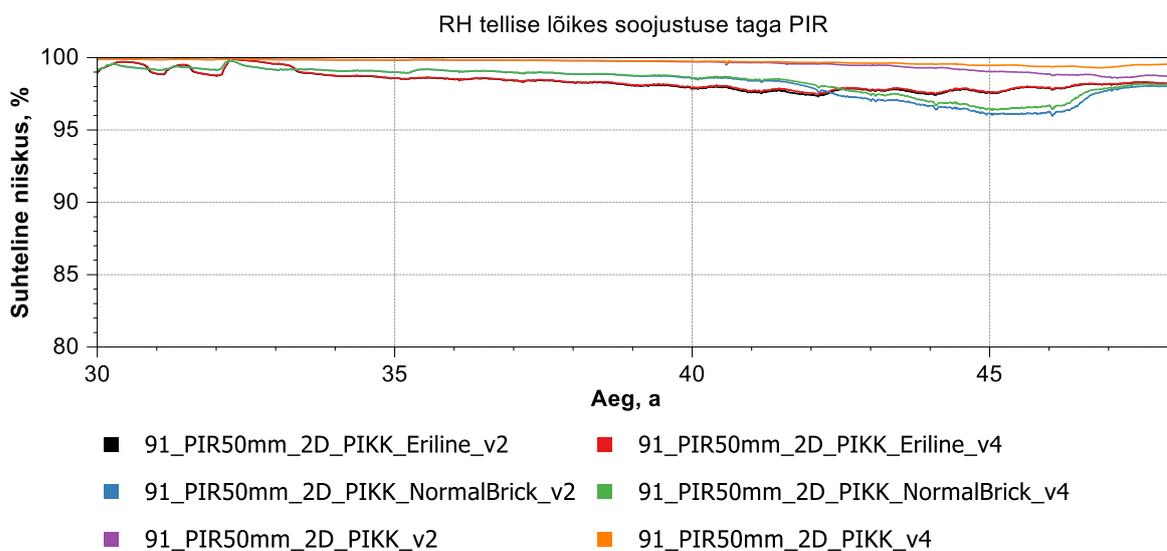
Joonis 4.35 Puidu mädaniku mudel puidu taga normal brick ID512 puhul, niiskusklass 1



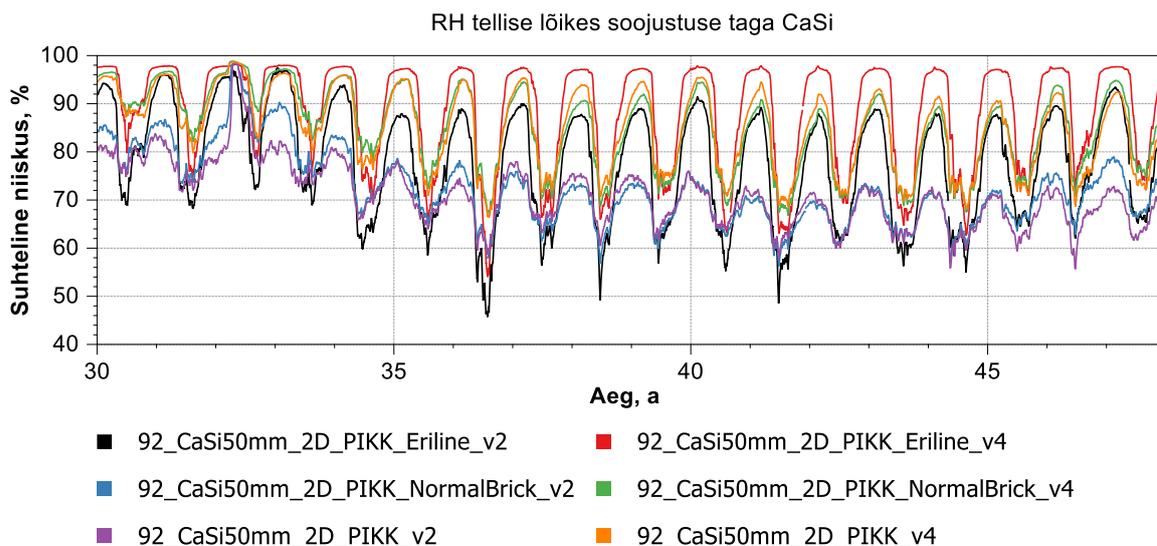
Joonis 4.36 Puidu mädaniku mudel puidu taga erilise tellise ID536 puhul, niiskusklass 2

Kuna puit ja tellis on erinevad materjalid erinevate omadustega ning hallituse suhtes tundlikkus on erinev, siis vaatleme ka olukorda soojustuste ja tellise vahelises punktis. Eialgu vaatame kas tellise lõikes on materjalide käitumine vastavalt tellise omadustele ja niiskuslisale erinev kui ta oli puidu lõikes.

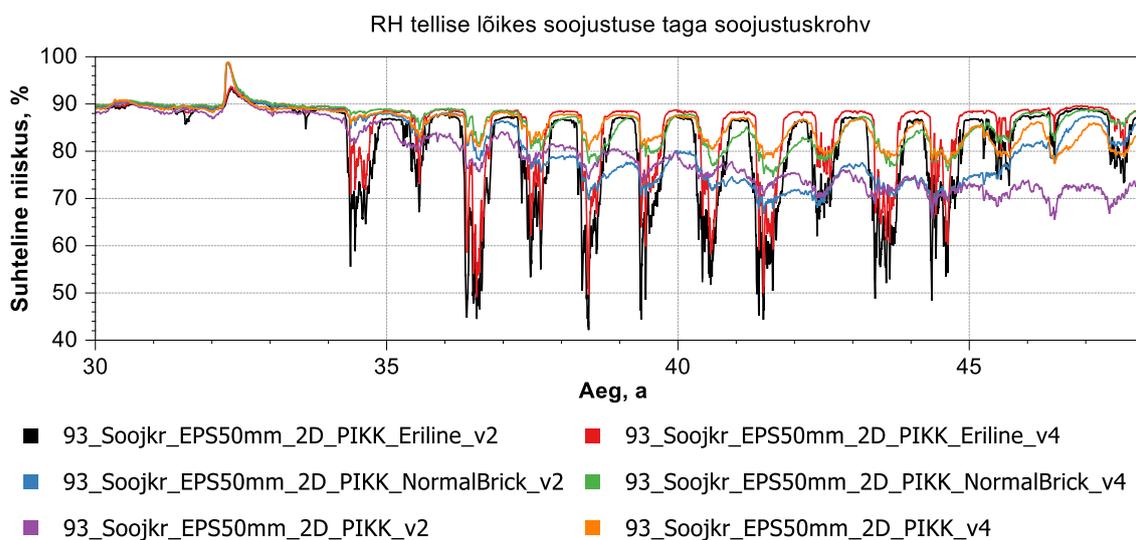
Joonis 4.37 kuni Joonis 4.39 on näha, et PIR-i taga on suhteline niiskus stabiilselt kriitiliselt kõrge. Sarnaselt puidu lõikele on näha niiskuslisa suurenemise mõju auru juhtivate soojustuste puhul. CaSi käitub sarnaselt puidu lõikes olevale CaSi-le, kuid soojustuskrohvi puhul on näha huvitavat käitumist. Esiteks on suur mõju kaldvihmal, sest ebausaldusväärse kaldvihma mõõtmise ajal on kõikide telliste puhul ja mõlema niiskuslisa puhul suhtelised niiskused võrdsed ja väga kõrged. Kuigi muutub suhtelise niiskuse käitumine on ta kõvasti kriitilisem ja kaootilisem kui CaSi korral.



Joonis 4.37 Suhteline niiskus tellise lõikes soojustuse PIR taga



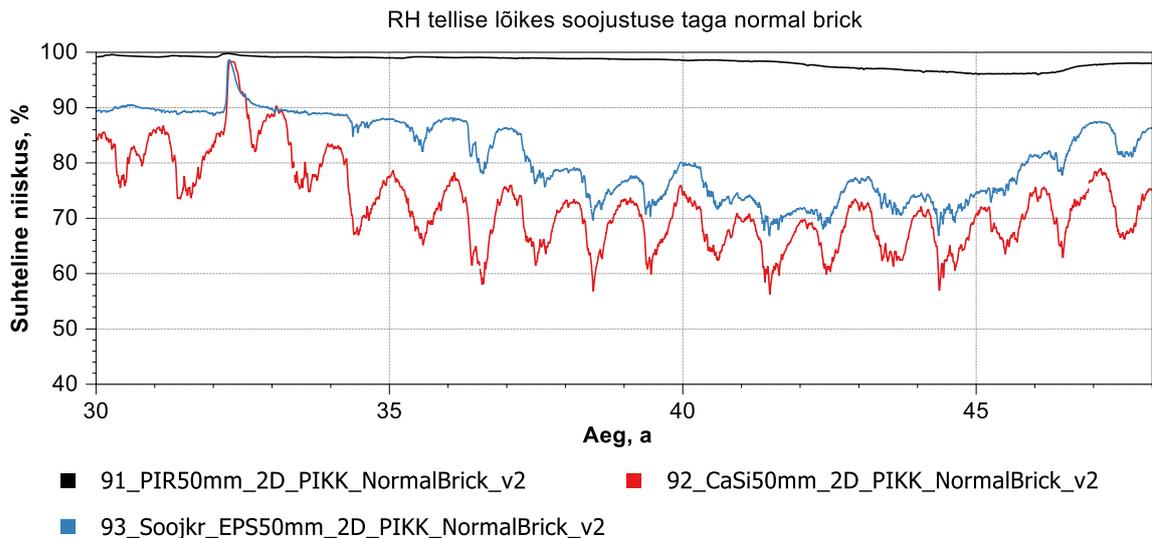
Joonis 4.38 Suhteline niiskus tellise lõikes soojustuse CaSi taga



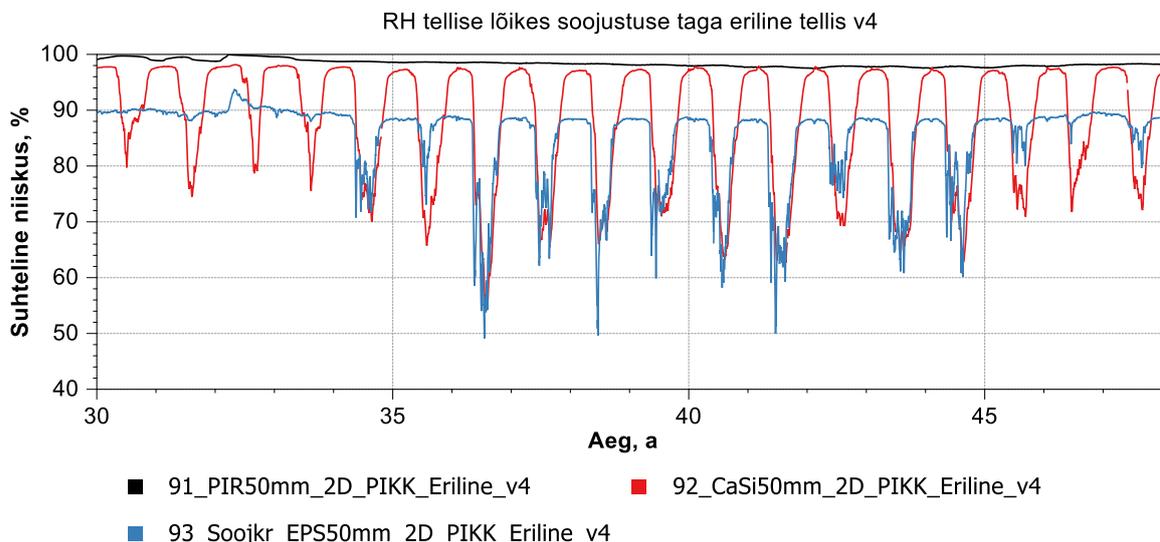
Joonis 4.39 Suhteline niiskus tellise lõikes soojustuskrohvi taga

Üldiselt suures pildis näitasid ka tellise lõigetes kõige paremaid tulemusi normal brick ID512 ja kõige halvemaid eriline tellis ID536.

PIR puhul on selge, et olukord stabiilselt väga niiske ja ohtlik. CaSi näitab leebemas olukorras päris lootustandvaid tulemusi, ohuks aga asjaolu, et kui vaadata karmimat olukorda, siis muutuvad niiskused soojustuse taga kriitiliseks ja lähevad stabiilselt suhtelise niiskuse väärtused väga kõrgele, sarnast käitumist on näha ka soojustuskrohvi puhul (Joonis 4.40, Joonis 4.41). Kas see ka hallitust põhjustab näitavad hallitusmudelid.

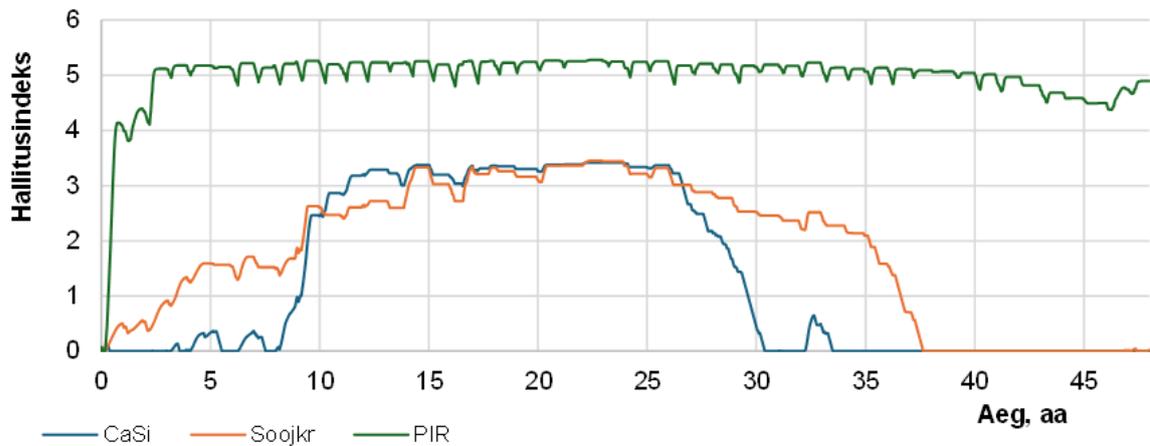


Joonis 4.40 Suhteline niiskus tellise lõikes soojustuse taga normal brick niiskusklass 1 puhul

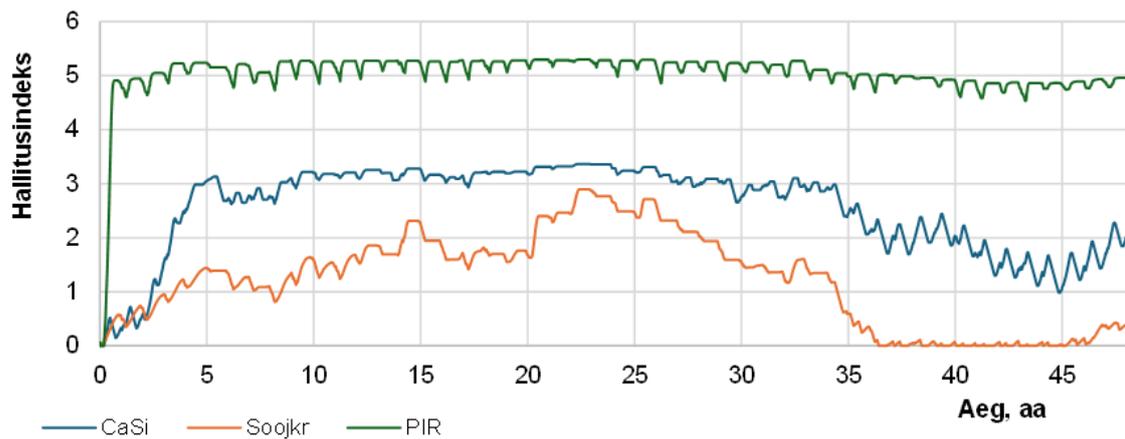


Joonis 4.41 Suhteline niiskus tellise lõikes soojustuse taga erilise tellise niiskusklass 2 puhul

Nagu oli ka arvata, siis PIR-i taga on hallituse tekke võimalus suur, sarnaselt puidu lõikes toimuvale. Hallitusindeks on stabiilselt 5, mis avatud seinal tähendaks, et üle 50% seinapinnast on nähtava hallitusega kaetud. Kuigi suhtelisi niiskuseid vaadates, on näha, et olukord on hullem, kui puidu lõikes, siis kuna tellis on vähem tundlik hallituse suhtes, püsivad soojustruskrohv ja CaSi puhul hallitusindeksid maksimaalselt 3 juures (Joonis 4.42, Joonis 4.43). Hallitusindeks 3 tähendab avatud seinal punktis väga vähest <10% silmaga nähtavat hallituse olemasolu või <50% ulatuses eksisteerivat mikroskoopilist hallitust. Kuna hallitusindeks püsib stabiilselt kolme ringis, siis on reaalne hallituse oht olemas, kuid see peaks olema minimaalne. Hallitusindeksid on siiski tagavara kasuks ning seoses kaldvihma mõjuga ei tohiks tegelikult olukord nõnda hull olla. Siiski on hallituse suhtes puidu lõikes olukord parem.

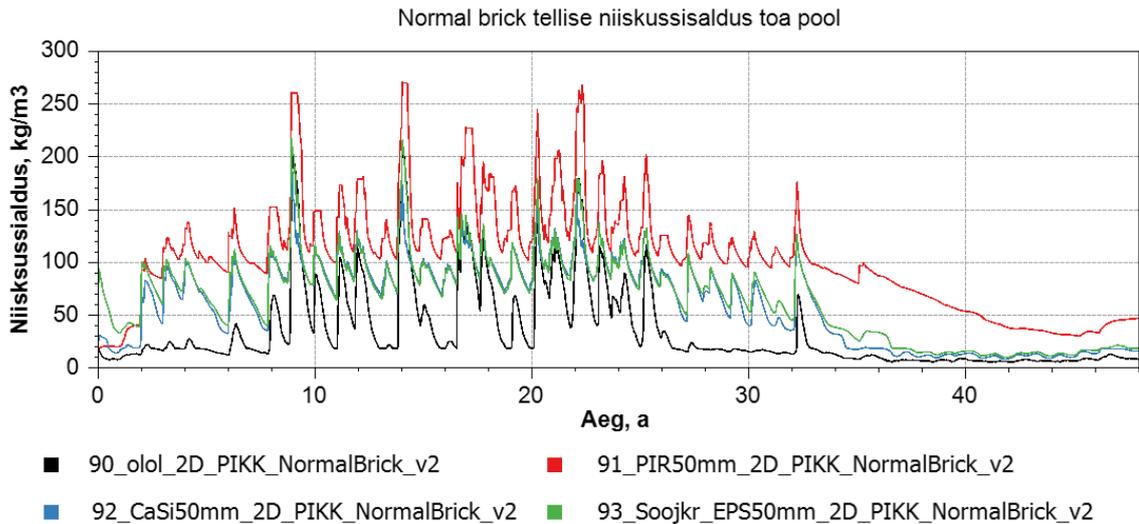


Joonis 4.42 Hallitusmudelid erinevate soojustuste taga tellise löikes Normal Brick ID512 korral, niiskusklass 1



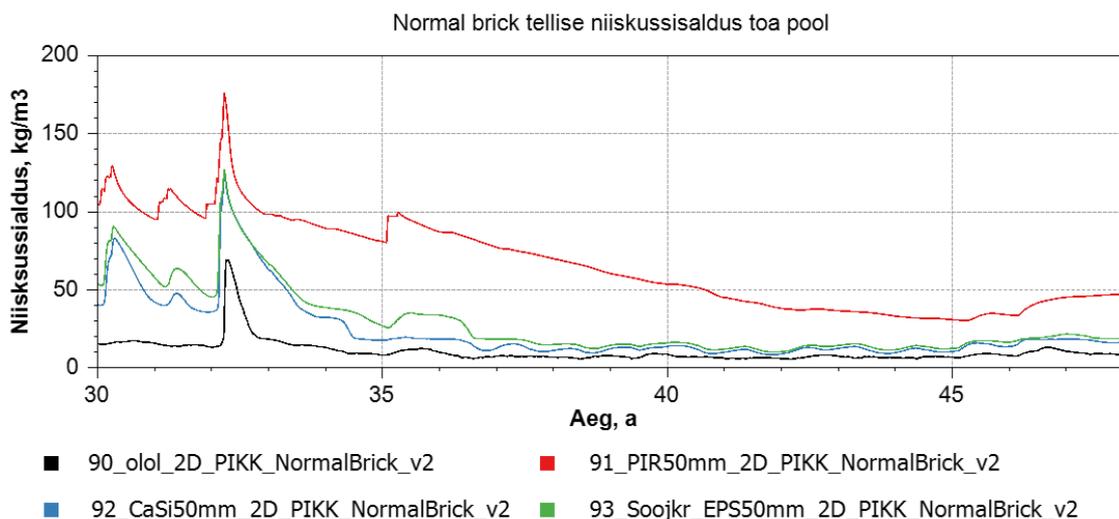
Joonis 4.43 Hallitusmudelid erinevate soojustuste taga tellise löikes Erilise tellise ID536 korral, niiskusklass 2

Kui me vaatame tellise niiskussisaldust kogu simulatsiooni perioodil (Joonis 4.44), näeme, et ka tellise niiskussisalduse juures mängib suurt rolli kaldvihma mõju, seega vaatleme ka tellise ja puidu niiskussisaldust simulatsiooni viimase 18 aasta jooksul ning vaatluse all on sarnaselt eelnevale normal brick, niiskusklass 1 ja eriline tellis niiskusklass 2.

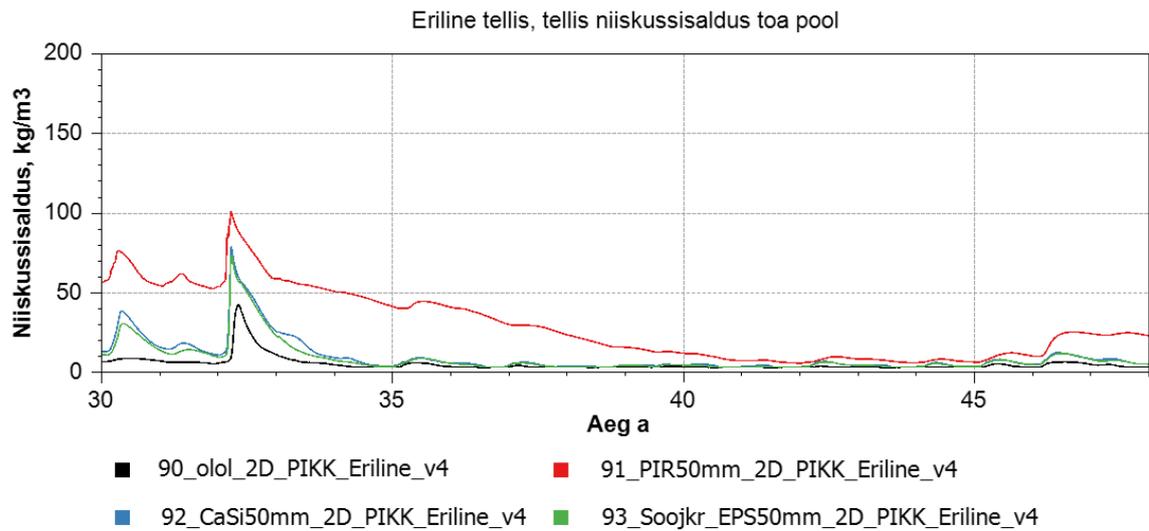


Joonis 4.44 Tellise niiskussisaldus tellise sees toa pool, Normal Brick, niiskusklass 1

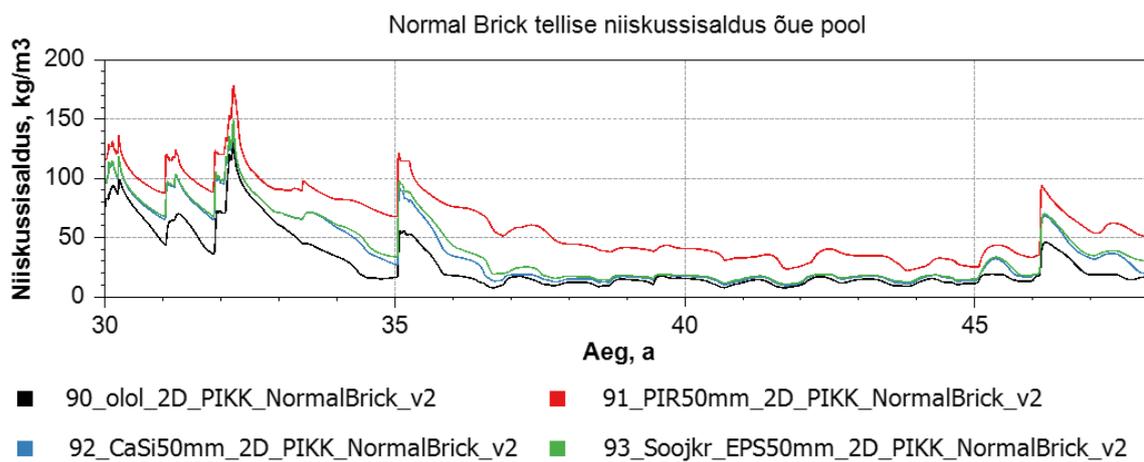
Võrdluse all on erinevate soojustuste puhul punkt tellise sees, mis asub toa pool (Joonis 4.45 ja Joonis 4.46) ning punkt mis asub väliskeskkonna pool (Joonis 4.47 ja Joonis 4.48). Peamiselt hakkab silma, et auru juhtivate soojustuste puhul olukord võrreldes olemasoleva olukorraga hullemaks ei lähe, muutused on minimaalsed kõikides vaate all olevates olukordades. Ainust suuremat erinevust on näha PIR soojustuse puhul, kus tellise niiskus on silmnähtavalt suurem kui olemasoleval olukorral ja ka soojustuskrohvi ja CaSi puhul. Samuti näeme, et mida suurem on arvetsatud kaldvihm, seda rohkem mõjutab ka soojustamine seina olukorda. Sellegipoolest, kuna viimased 18 aastat peaksid olema usaldusväärsed ja seal kaldvihmast tulenevat suuremat mõju seinale auru juhtiva soojustuse kasutamise korral näha ei ole, siis võime seda ka usaldada.



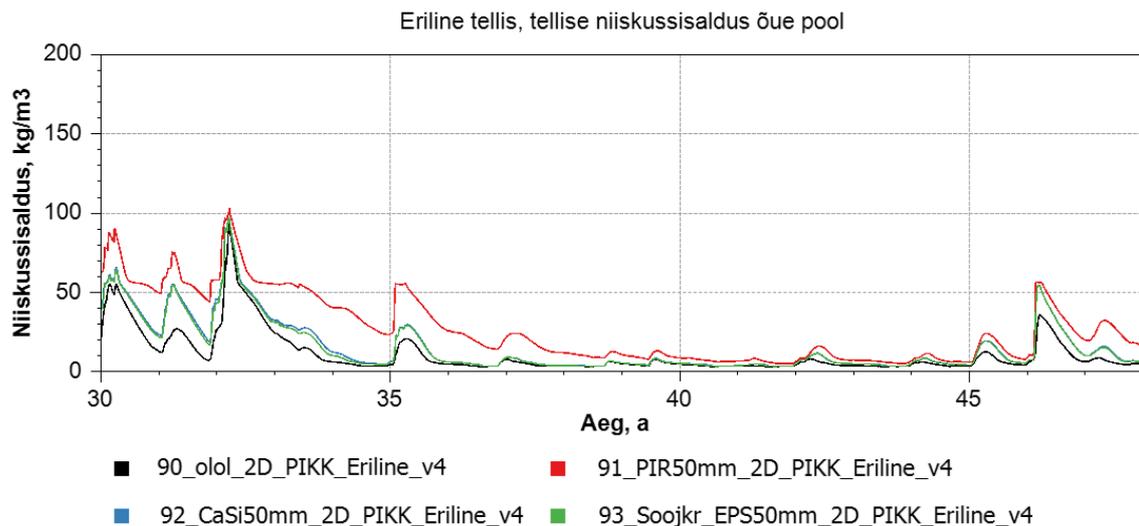
Joonis 4.45 Tellise niiskussisaldus tellise sees toa pool, Normal Brick, niiskusklass 1



Joonis 4.46 Tellise niiskussisaldus seina sees toa pool, Eriline tellis, niiskusklass 2

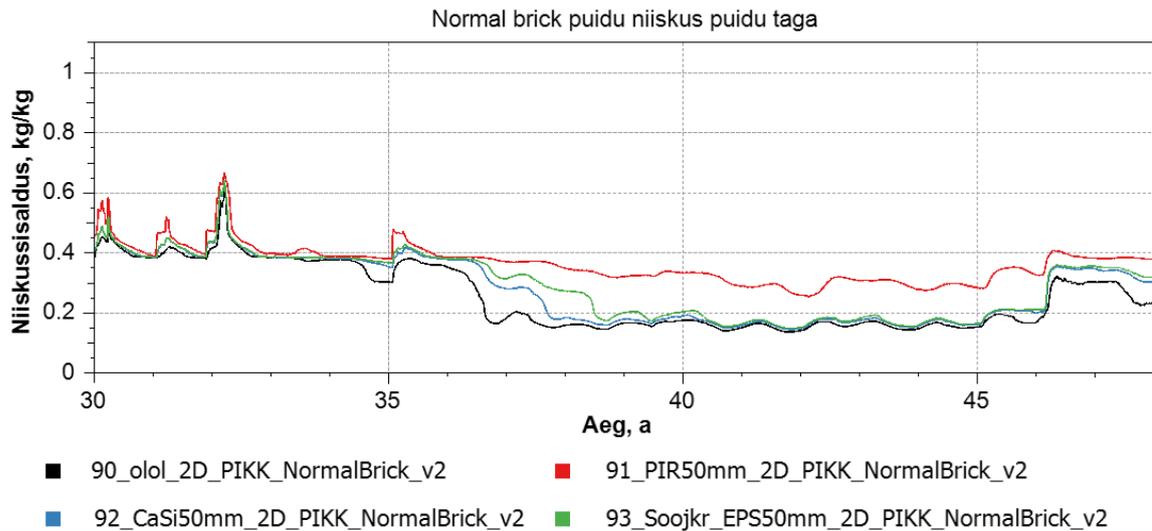


Joonis 4.47 Tellise niiskussisaldus seina sees õue pool, Normal Brick, niiskusklass 1

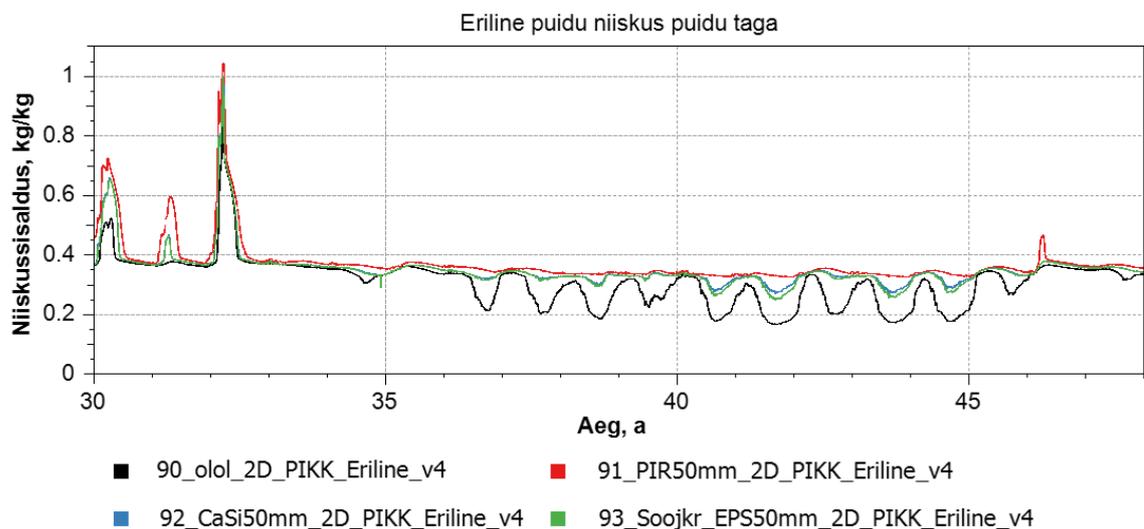


Joonis 4.48 Tellise niiskussisaldus seina sees õue pool, Eriline tellis, niiskusklass 2

Järgnevalt näeme puidu taga ehk tellise sees asuva puidu niiskussisaldust erinevate soojustuste puhul nii normal brick, niiskusklass 1 puhul kui ka erilise tellise, niiskusklass 2 puhul (Joonis 4.49 ja Joonis 4.50). Peamine oht antud punktis on puidu mädanemine ning kui vaatasime sama punkti mädanikumudeleid, oli näha puidu kiiret täielikku mädanemist. Küll aga antud mädanikumudelid olid koostatud arvestades reaalsusest suuremat kaldvihma. Kui vaatame usaldusväärsemalt mõõdetud perioodil puidu niiskust samas punktis, näeme, et erilise tellise korral on puidu niiskus stabiilselt üle 30%, mis on kriitiline seisund ja mädaniku teke on tõenäoline. Normal brick puhul, kõik peale PIR soojustuse püsivad peale stabiliseerumist 20% ringis, mis ei ole küll mädaniku tekkeks päris kriitiline, kuid näeme ka 46. aastal kriitilisema aasta puhul kohest niiskuse tõusmist puidust juba üle kriitilise piiri. Seega puidu seis tellise sees ei ole kuigi hea ühegi soojustuse ega ka tellise puhul. Arvestades, et reaalne sein koosneb erinevate omadustega telliste segust ning puit tellise sees ei ole värsket ja kuivat puit, siis on oodata suure tõenäosusega puidu edasist mädanemist. Lisaks näeme, et võrreldes olemasoleva olukorraga muudab soojustamine puidu seis tellises halvemaks. Seda jällegi PIR-i puhul kõige rohkem ja auru juhtivate soojustuste puhul minimaalselt.



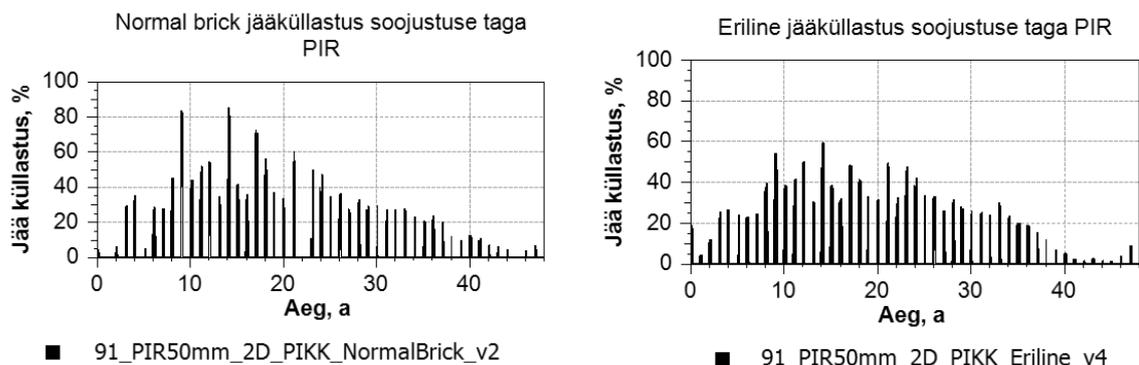
Joonis 4.49 Puidu niiskus puidu taga, Normal Brick, niiskusklass 1



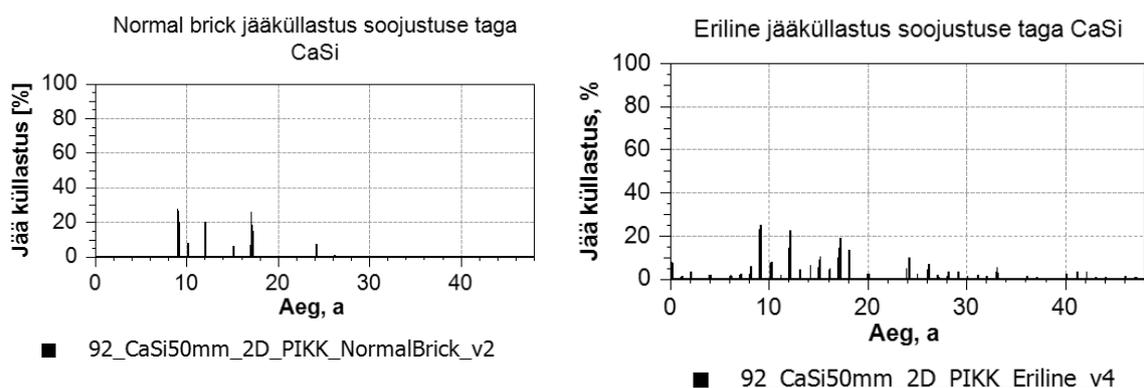
Joonis 4.50 Puidu niiskus puidu taga, Eriline tellis, niiskusklass 2

Jääküllastuse puhul vaatleme kogu simulatsiooni perioodi. Ka siin tuleb arevstada, et esimesed 30 aastat simulatsioonist on mudelid ja tulemused ebausaldusväärsed ja tagavara kasuks, siis annab see siiski meile ettekujutust, millise soojustuse puhul on olukord suures pildis parem ja millises halvem. Joonis 4.51, Joonis 4.52 ja Joonis 4.53 annavad meile ülevaate jääküllastumisest erinevate soojustuste puhul soojustuse taga normalbrick, niiskusklass 1 puhul (vasak) ja erilise tellise niiskusklass 2 puhul (parem). Joonis 4.54 näitab olemasoleva seina jääküllastumist seina sees toa poolses punktis. Selget erinevust on näha auru juhtiva ja aurutiheda soojustuse juures. Soojustuskrohvi ja CaSi puhul on jääküllastus minimaalne, seda isegi simulatsiooni esimese 30 aasta jooksul. PIR puhul on näha pidevat seina jäätumist, kuigi simulatsiooni lõpu poole olukord paraneb, on tegemist palju halvema ja kriitilisema seisuga kui teiste soojustuste

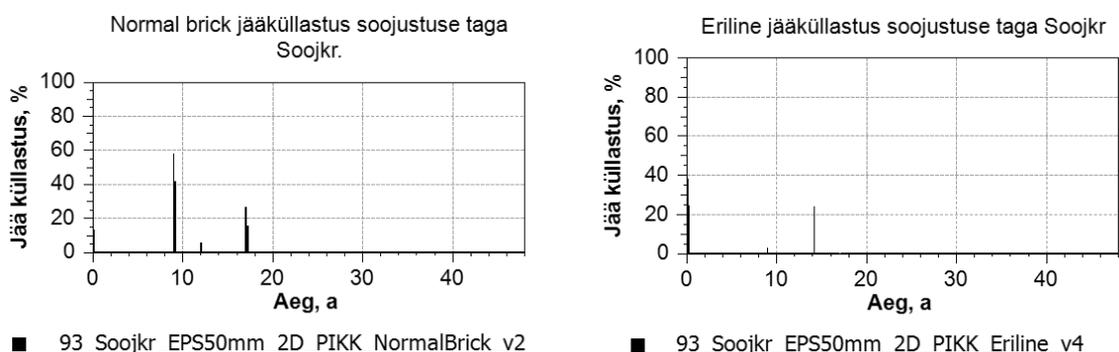
puhul. Lisaks näeme, et soojustuskrohvi ja CaSi puhul olukord palju hullemaks ei lähe kui olemasoleva konstruktsiooniga. Kuigi punktid ei ole üks-ühele võrreldavad, siis on auru juhtivate soojustuste puhul siiski jääküllastuse poole pealt olukord normaalne.



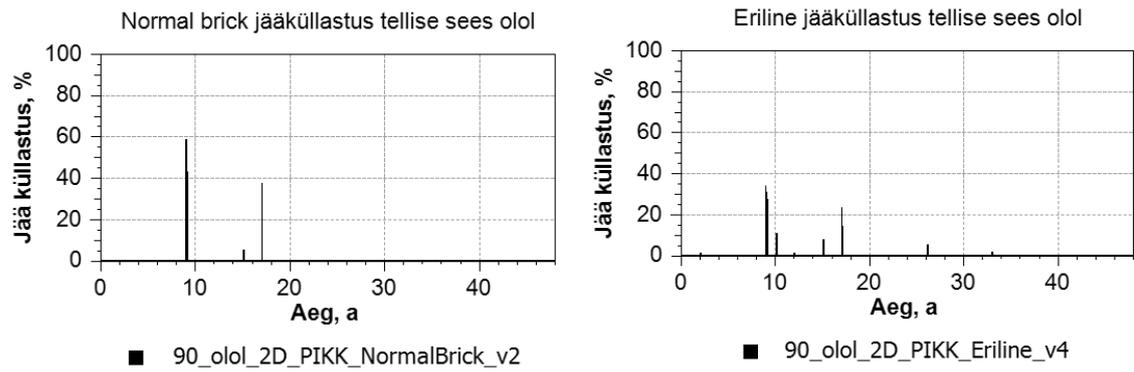
Joonis 4.51 Jääküllastus PIR soojustuse taga tellise löikes: Normal Brick, niiskusklass 1 (vasakul); Eriline tellis, niiskusklass 2 (paremal)



Joonis 4.52 Jääküllastus CaSi taga tellise löikes: Normal Brick, niiskusklass 1 (vasakul); Eriline tellis, niiskusklass 2 (paremal)



Joonis 4.53 Jääküllastus soojustuskrohvi taga tellise löikes: Normal Brick, niiskusklass 1 (vasakul); Eriline tellis, niiskusklass 2 (paremal)



Joonis 4.54 Jääküllastus olemasolev sein tellise lõikes toa pool seina sees: Normal Brick, niiskusklass 1 (vasakul); Eriline tellis, niiskusklass 2 (paremal)

## KOKKUVÕTE

Käesolevas uuringus käsitleti kolme erineva soojustuslahenduse toimivust vahvarkseina seespoolse soojustamise korral. Vahvarksein on ajalooline seinakonstruktsioon, kus suuremõõtmelise puitkarkassiga vahed on täis laotud ajaloolistest tellistest. Seina muudab keerukaks konstruktsiooni sisse jääv kandvat rolli mängiv puitkarkass ning seinas olevad ajaloolised tellised. Vaatluse all oli aurutihe PIR ja aurujuhtivad soojustusmaterjalid CaSi ja termokrohv. Soojustuste paksus oli 50mm.

Katseliselt mõõdeti soojustussüsteemide niiskustehnilist toimivust Keeni mõisas reaalses seinakonstruktsioonis, mõõtmistulemuste ja esialgse arvutusmudeli võrdlemisel ja analüüsil kalibreeriti pikaajalise simulatsiooni arvutusmudel Delphin programmis 2D-s. Kuna olemasolev konstruktsioon koosneb väga eri omadustega tellistest, siis on simulatsioon viidud läbi kolme erineva tellisega ning kõik tellised omakorda läbi arvutatud mudelites, kus siseruumi niiskuskooormuseks kasutatud niiskusklass 1 ja niiskusklass 2. Mudelis kasutati Tõraveres vahemikus 1970-2018 mõõdetud väliskliimat.

PIR soojustuse puhul ei ole vahet mis tellisega on tegu või kui suur on niiskuslisa, aurutihe soojustus ei luba niiskusel toa poole välja kuivada ning suhteline niiskus soojustuse taga püsib stabiilselt kriitiliselt kõrge. Lisaks toimub seinas pidev jäätumine ning olemasolev seinakonstruktsioon on võrreldes olemasoleva olukorraga palju halvemas seisus. On suur oht soojustuse taga hallituse tekkele ja puidu täielikule mädanemisele.

CaSi näitab tänu oma auru juhtivatele omadustele palju lootustandvamaid tulemusi kui PIR. Soojustuse taga on suhteline niiskus normi piires ja hallituse tekke oht väike, seinas jäätumine soojustuse taga ei valmista probleemi. CaSi puhul näeme suurt niiskusklassist ja ka tellise omadustest tulenevat mõju. Kuna soojustus laseb toapoolset niiskust läbi, siis mida suurem on toa poolne niiskuskooormus, siis seda hullem ka olukord seinas. Arvutustulemused näitavad CaSi puhul kohati suuri suhtelise niiskuse kõikumisi ja kaootilisust. Kuna realses seinas on erinevate omadustega tellised segamini, siis võib sellest tulenev mõju ja kaootilisus olla kriitiline. Lisaks näeme negatiivset mõju kaldvihma poolt, mis kasvõi natuke suurema kaldvihma korral kohe tulemused kriitilisse piirkonda viivad. Ka puidu taga on mädaniku oht suur ja seda peamiselt ilmselt kaldvihma tõttu.

Soojustuskrohv näitas simulatsioonide põhjal veel paremaid tulemusi kui CaSi. Niiskuse, hallituse ja jääküllastuse koha peal suuri probleeme ei olnud, sarnaste omaduste tõttu

on sarnaselt CaSi-le niiskusklassi mõju suur ning kaldvihma tõttu ka puidu taga mädanemise oht. Varasemad uuringud on näidanud, et ilma CCR katseta määratud materjaliomadused ülehindavad vedelikujuhtivust. Seetõttu on Delphini soojustuskrohvi materjalifail vähem usaldusväärne kui CaSi oma ja on põhjust arvata, et simulatsioon on kallutatud tagavara kahjuks. Seega tuleks soojustuskrohvi peal teostada CCR-test, et kinnitada mudeli toimivust antud materjali juures.

Kõikide soojustuslahenduste puhul paranes seinä soojapidavus ja soojuslik mugavus. Tulenevalt PIR-i madalast soojuserijuhtivusest oli PIRi puhul seinä soojapidavus rohkem kui kaks korda suurem kui CaSi ja soojustuskrohvi puhul, kuid siiski võrreldes olmeasoleva seinaga paranesid ka auru juhtivate soojustuste puhul soojapidavused märgatavalt. Samal põhjusel näeme ka PIR-i taga madalamat temperatuuri, kõrgemat suhtelist niiskust ja kõrgemat jääkültsatust

CaSi ja termokrohvi puhul tuleks koostada mudelid, kus kaldvihma mõju ei ole arvestatud, kui sellisel juhul on tulemused paremad ja ei põhjusta hallitust soojustuse taga ega ka puidu mädanikku, tuleks kaaluda seinä hüdrofobiseerimist. Kuna välikatsel puidu lõikes saadud mõõtmistulemuste ja esialgse arvutusmudeli võrdluse puhul jäid lahtiseks põhjused, mis toimub reaalses seinas puidu lõikes teisiti kui seda mudel arvutab, siis paremaks olemasoleva seinä käitumise mõistmiseks ja arvutusmudeli kalibreerimiseks oleks mõistlik mõõtmisperioodi pikendada ja seinä käitumist pikema aja jooksul jälgida. Ka soojustussüsteemide puhul oleks mõistlik paremaks analüüsiks jälgida mõõtmistulemusi pikema aja vältel. Lisaks seinä käitumise võrdluseks erinevate soojustuste puhul analüüsida mudeleid, määrates neile samad soojustakistused.

Kuna vahvarkseina seespoolse soojustamise puhul on tegemist ohtliku tegevusega, siis lõplike järelduste tegemiseks tuleks katsetada lähemalt soojustuskrohvi materjali, et näha kas Delphin programmis olev materjalifail käitub selliselt nagu ka reaalses elus, tuleks kaaluda välisfassaadi hüdrofobiseerimist ning tuleks seinä jälgida pikemat aega, et näha reaalse seinä käitumist erinevate soojustuste puhul.

## ENGLISH SUMMARY

This study investigates the performance of three different insulation solutions for the internal insulation of a half-timbered wall. A half-timbered wall is a historic wall construction where the spacing between the large wooden frames is filled with historical bricks. What makes the wall special and complicated is the timber frame within the structure which has a load-bearing role and also the historic bricks in the wall. The diffusion-tight PIR and the diffusion-open capillary active insulating materials CaSi and insulation plaster were examined. The thickness of the insulation was 50mm.

The hygrothermal performance of the insulation systems was measured experimentally in Keeni Manor, on a real wall construction, where test walls were built, by comparing the results of the measurements and the initial calculation model the model was calibrated. The wall was simulated in a 48 year model in Delphin 2D. As the existing structure consists of bricks with very different properties, the simulation was made with three different bricks and all bricks have in turn been calculated in models with indoor humidity class 1 and humidity class 2. The model was based on the outdoor climate measured in Tõrave between 1970 and 2018.

With PIR insulation, it doesn't matter what brick was used or how high the moisture content is, the vapour-dense insulation will not allow the moisture to dry out towards the room and the relative humidity behind the insulation will remain critically high. In addition, there is continuous freezing in the wall and the existing wall construction is in a much worse condition than the existing situation. There is a high risk of mould growth behind the insulation and complete decay of the wood.

CaSi shows much more promising results than PIR due to its diffusion-open capillary active properties. The relative humidity behind the insulation is within the norm and the risk of mould growth is low, ice saturation behind the insulation is not a problem. In the case of CaSi, we see a large effect due to the humidity class and also the brick properties. Since the insulation allows moisture to pass through from the room side, the higher the moisture load from the room side, the worse the situation in the wall. Calculation results show at times large relative humidity fluctuations and somewhat chaotic behaviour for CaSi. As bricks with different properties are mixed in the existing wall, the resulting impact of that chaotic behaviour can be critical. In addition, we can see negative effects from wind driven rain, which, even with a slightly heavier wind driven rain, immediately bring the results into the critical region. There is also a high

risk of decay behind the wood in the wall, and this is mainly probably due to the wind driven rain.

Based on the simulations, the insulation plaster showed even better results than CaSi. There were no major problems with humidity, mould or ice saturation, but due to similar properties as CaSi, the influence of the humidity class is high and the risk of decay behind the wood due to wind driven rain is also high. Previous studies have shown that material properties determined without a CCR test overestimate liquid conductivity. As a result, the material data file for Delphin insulating plaster is less reliable than that for CaSi, and there is reason to believe that the simulation is biased negatively. Therefore, a CCR test should be carried out on the insulating plaster to confirm the performance of the model on this material.

All insulation systems improved the thermal performance and thermal comfort of the wall. Due to the low thermal conductivity of PIR, the thermal performance of the wall was more than twice as high for PIR as for CaSi and insulating plaster, but still, compared to the existing wall, the thermal performance of the diffusion-open insulations also improved significantly. For the same reason, we also see lower temperatures, higher relative humidity and higher ice saturation behind PIR.

In the case of CaSi and insulation plaster, models should be made where the effect of wind driven rain is not taken into account, if in this case the results are better and do not cause mould behind the insulation nor wood decay, exterior hydrophobisation should be considered. As the comparison of the field test measurements and the initial calculation model in the section of the wood left questions for what the reason is for what happens in the real wall around the wood differently from the model calculation, it would be reasonable to extend the measurement period and monitor the wall behaviour over a longer period of time to better understand the existing wall behaviour and to calibrate the calculation model. For insulation systems it would also make sense to monitor the measurement results over a longer period of time for better analysis. In addition, to compare the wall behaviour of different insulation systems, the models should be analysed by assigning the same thermal resistance.

Since insulating a half-timbered wall internally is a dangerous activity, in order to draw definitive conclusions, it is necessary to test the insulating plaster material more closely to see if the material file in Delphin program behaves as it does in real life, to consider hydrophobisation of the exterior wall, and to monitor the wall over a longer period of time to see how the real wall behaves with different insulation systems.

# KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- AG, S. (s.a.). *SHT35*. Sensirion AG. Salvestatud 22. veebruar 2024, <https://sensirion.com/products/catalog/SHT35-DIS-B/>
- Amirzadeh, A., Strand, R. K., Hammann, R. E., & Bhandari, M. S. (2018). Determination and Assessment of Optimum Internal Thermal Insulation for Masonry Walls in Historic Multifamily Buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 24(3), 04018016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000320)
- Arumägi, E., Pihlak, M., & Kalamees, T. (2015). Reliability of Interior Thermal Insulation as a Retrofit Measure in Historic Wooden Apartment Buildings in Cold Climate. *Energy Procedia*, 78, 871–876. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.010>
- Beata Nowogońska. (2020). Consequences of improper renovation decisions in a 17th century half-timbered building. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 29(4), 557–566. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2020.29.4.48>
- Bottino-Leone, D., Larcher, M., Herrera-Avellanosa, D., Haas, F., & Troi, A. (2019). Evaluation of natural-based internal insulation systems in historic buildings through a holistic approach. *Energy*, 181, 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.139>
- Delphin 5 Help | Manualzz*. (s.a.). manualzz.com. Salvestatud 23. veebruar 2024, <https://manualzz.com/doc/6615961/delphin-5-help>
- Epatherm\_etp.pdf*. (s.a.). Salvestatud 20. märts 2024, [https://www.langeproon.ee/wp-content/uploads/epatherm\\_etp.pdf](https://www.langeproon.ee/wp-content/uploads/epatherm_etp.pdf)
- Eßmann, F. (2022). Chapter 2.4—Peculiarities of installing internal insulation in half-timbered walls; detailed solutions; some examples. K. G. Wakili & T. Stahl (Toim), *Energy-Efficient Retrofit of Buildings by Interior Insulation* (lk 219–246). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816513-3.00010-1>
- EVS-EN ISO 13788:2012*. (s.a.). EVS. Salvestatud 21. veebruar 2024, <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13788-2012>
- Giuseppe, E. D., D’Orazio, M., Du, G., Favi, C., Lasvaux, S., Maracchini, G., & Padey, P. (2020). A stochastic approach to LCA of internal insulation solutions for historic buildings. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 12(4), 1535-. <https://doi.org/10.3390/su12041535>

- Grant SQ2020-1F8. (s.a.). CAS Dataloggers. Salvestatud 22. veebruar 2024, <https://dataloggerinc.com/product/sq2020-1f8-portable-universal-input-data-logger/>
- GW1101 Wi-Fi Weather Station Gateway with Solar Powered 7-in-1 Outdoor. (s.a.). Ecowitt. Salvestatud 19. märts 2024, <https://shop.ecowitt.com/products/gw1101>
- HFP01 heat flux plate. (s.a.). Salvestatud 22. veebruar 2024, <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-sensors/hfp01-heat-flux-sensor>
- Jarosz, M. (2014). *Insulating timber-framed walls of historical buildings using modern technologies and materials*. 491–498. <https://doi.org/10.2495/HPSM140451>
- Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., Andersen, B., & Møller, E. B. (2021). Hygrothermal performance of six insulation systems for internal retrofitting solid masonry walls. *Journal of Building Physics*, 44(6), 539–573. <https://doi.org/10.1177/1744259120988745>
- Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., & Møller, E. B. (2020). Hygrothermal assessment of four insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls through calibrated numerical simulations. *Building and Environment*, 180, 107031. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107031>
- Kalamees, T., Kõiv, T.-A., Liisas, R., Õiger, K., Kallavus, U., Mikli, L., Ilomets, S., Kuusk, K., Maivel, M., Mikola, A., Klõšeiko, P., Agasild, T., Arumägi, E., Liho, E., Ojang, T., Tuisk, T., Raado, L.-M., & Jõesaar, T. (2010). *Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga*. Tallinna Tehnika Ülikool.
- Klõšeiko, P. (2014). *Seespoolse lisasoojustusega tellisseina soojus- ja niiskustehniline toimivus Kohtla-Järve koolimaja näitel*. Tallinna Tehnika Ülikool.
- Klõšeiko, P., & Kalamees, T. (2022). *Hygrothermal Performance of Masonry Walls Retrofitted with Interior Insulation in Cold Climate*. <https://digikogu.taltech.ee/et/item/e4e4dc01-f8cf-4d60-b205-3f01529a8fc1>
- Klõšeiko, P., Valk, T., Põldaru, M., & Kalamees, T. (2023). Capillary condensation redistribution (CCR) test: Measurement results of 5 materials and comparison to modelling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2654(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012047>
- Kurnitski, J. et al. (s.a.). Salvestatud 21. veebruar 2024, <https://ws.lib.ttu.ee/publikatsioonid/et/publ/item/2b223bb1-8b08-4689-b61a-22788d096d12>

- Latz, S., Scholzen, F., Thewes, A., & Maas, S. (2022). Comparison of high-performance and conventional internal insulation materials based on hygrothermal analysis using in situ measurements and simulation. *Bauphysik*, *44*(1), 9–20. <https://doi.org/10.1002/bapi.202100039>
- Maiste, J. (1984). *ENSV ehituskomitee arhitektuurimälestiste kaitse inspeksioon*.
- Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., & Salminen, K. (2010, jaanuar 1). *Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials: 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, Buildings XI*. <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=84926522398&partnerID=8YFLogxK>
- Omnisense S-2*. (2024). OmniSense LLC. <https://www.omnisense.com/Store/s-2-wireless-sensor-with-2-ports-for-t-and-rh-wme-socket-and-64k-reading-datalogging-memory-03c20rh>
- Roels, S., & Tijssens, A. (2023). *Why 1D-simulations can underestimate the risk on moisture damage in timber frame constructions*. 020055. <https://doi.org/10.1063/5.0171198>
- Soil Moisture Sensor—VH400*. (s.a.). Salvestatud 22. veebruar 2024, <https://www.vegetronix.com/Products/VH400/>
- Therma TW50 Kiviseina plaat*. (s.a.). Kingspan.com. Salvestatud 20. märts 2024, <https://www.kingspan.com/ee/et/tooted/soojustusplaadid/seina-soojustusplaadid/therma-tw50/>
- TM\_weber.therm\_505\_HDP.pdf*. (s.a.). Salvestatud 20. märts 2024, [https://www.de.weber/files/de/2017-09/TM\\_weber.therm\\_505\\_HDP.pdf](https://www.de.weber/files/de/2017-09/TM_weber.therm_505_HDP.pdf)
- Viitanen, H., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Vinha, J., Lähdesmäki, K., & Salminen, K. (2011). Mould growth modelling to evaluate durability of materials: 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, XII DBMC. *XII DBMC: International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 409–416.
- Viitanen, H., Peuhkuri, R., Ojanen, T., & Toratti, T. (2008). *Service life of wooden materials – mathematical modelling as a tool for evaluating the development of mould and decay*.
- Walker, R., & Pavía, S. (2018). Thermal and moisture monitoring of an internally insulated historic brick wall. *Building and Environment*, *133*, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.020>
- Worch, A., & Stelzmann, M. (2019). Feuchtetechnisches Verhalten von Innendämmsystemen mit hohen Dämmstoffdicken. *Bauphysik*, *41*(4), 193–198. <https://doi.org/10.1002/bapi.201900015>

**LISAD**

## **GRAAFILINE OSA**